René Prigent
Mathieu Auclerc



RÉGULATION ET AUTOMATISME DES SYSTÈMES FRIGORIFIQUES

2e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © ras-slava – Fotolia.com

ISBN 978-2-10-059324-8
Première édition parue en 2010 aux éditions Dunod
dans la collection « Aide-mémoire de l'ingénieur »

Préface

La deuxième édition de cet ouvrage portant le titre de *Régulation et automatisme des systèmes frigorifiques* fait suite à un premier ouvrage édité en 2010 qui a connu un large succès auprès d'un public de professionnels et d'étudiants impliqués dans des études appliquées d'ingénieurs en génie frigorifique. Tout particulièrement les auditeurs de l'IFFI (Institut français du froid industriel et du génie climatique) ont pu apprécier la clarté, l'exhaustivité et le caractère concret de cet ouvrage ainsi que des exposés des auteurs qui interviennent régulièrement dans cet institut.

Depuis quelques années, le génie frigorifique connaît des évolutions techniques, réglementaires et professionnelles profondes. En effet, les contraintes réglementaires et économiques – que l'on sait durables – devraient favoriser dans les années à venir le développement et la mise en place d'équipements et de systèmes frigorifiques répondant à des exigences accrues de performance : fiabilité, sûreté, sobriété en fluide frigorigène mais également efficacité énergétique. Ce dernier point apparaît comme une nouvelle demande des exploitants et des maîtres d'ouvrage conscients de l'augmentation à venir des coûts énergétiques et soucieux de montrer au grand public leur attachement à une technologie frigorifique à moindre impact sur l'environnement.

Les composants majeurs (compresseurs, échangeurs de chaleur, dispositif de détente…) équipant les systèmes frigorifiques ont fait l'objet de nombreux développements techniques innovants pour répondre à ces exigences : rendement et efficacité élevés, dispositif d'adaptation aux charges frigorifiques variables, acceptation de fluides frigorigènes « nouveaux »…

Au-delà du développement de composants à haute performance, l'enjeu majeur pour les professionnels du génie frigorifique réside certainement dans la conception, la mise en œuvre et l'exploitation de systèmes frigorifiques intégrant ces différentes technologies de composants. Dans le processus de conception, c'est la cohérence dans la sélection des composants techniques

ainsi que la pertinence des modes et des techniques de régulation qui permettront d'obtenir un système frigorifique efficace, fiable et répondant aux exigences de l'exploitant. Lors de l'exploitation, sans aucun doute, l'obtention des performances nominales du système et le maintien dans le temps de celles-ci ne pourront être réalisés que grâce à un contrôle régulier des paramètres de la régulation et du pilotage de l'installation.

Il apparaît clairement que la maîtrise des méthodes et technologies des dispositifs de régulation et de pilotage des installations frigorifiques est l'une des compétences incontournable de tout professionnel du génie frigorifique.

En réponse à ces nouveaux défis techniques, nous devons à MM. Prigent et Auclerc d'avoir rédigé un ouvrage particulièrement pédagogique qui, sous une forme synthétique, aborde tous les éléments méthodologiques, techniques et applicatifs indispensables à la pratique de la régulation et des automatismes par les « frigoristes ». Nous ne pouvons que recommander à tous – étudiants, pédagogues et professionnels – la lecture et la mise en pratique des savoirs et des règles de l'art exposés dans cet ouvrage.

Christophe MARVILLET

Directeur de l'IFFI
(Institut français du froid industriel et du génie climatique)

Table des matières

Remerciements

Chères lectrices et cher lecteurs,

Lorsque ce projet de livre a été esquissé, j'étais loin de supposer que nous serions amenés à réaliser une deuxième édition et cela, dans un laps de temps aussi faible.

Cela démontre que les domaines du génie frigorifique et du génie climatique suscitent un intérêt marqué.

Puisque l'occasion m'en est donnée, je profite de la présente pour rappeler aux débutantes et débutants qu'ils doivent avoir un regard de curiosité dans leur démarche d'apprentissage.

Les éléments techniques abordés dans ce livre doivent susciter des réflexions donnant des points d'entrée sur des connaissances plus étendues.

Pour ce faire, ils rencontreront, dans leur carrière, de nombreux professionnels compétents qui pourront les aider à parfaire leur connaissance.

Cette démarche a été et est encore mienne.

Ce livre n'est que le reflet partiel du savoir des nombreuses personnes qui m'ont dispensé leur enseignement.

Il m'apparaît également important de souligner que les enseignants et les professionnels jouent un rôle déterminant dans la carrière d'une personne.

Aurions-nous ou prendrions-nous la même direction professionnelle si nous n'avions pas rencontré certaines personnes qui nous ont fortement guidés ou impressionnés par leur compétence ?

Pour ma part, la réponse me semble évidente et, pour cela, les remerciements sont des mots bien faibles qui ne correspondent pas à la grande gratitude que je ressens.

Enfin, je n'oublie pas la famille et les proches qui ont un rôle important dans l'épanouissement tant personnel que professionnel.

René PRIGENT

Cet ouvrage sera pour moi l'occasion de remercier l'ensemble de mon entourage professionnel.

À ce titre, je pense aussi bien aux différents acteurs de la Grande et Moyenne Surface que ceux de l'industrie frigorifique que j'ai la chance de côtoyer et avec qui je peux avoir de nombreux échanges.

Je tiens également à rendre hommage à une personne qui serait, je pense, fière de moi pour la participation à ce second ouvrage.

Enfin, merci encore une fois à ma famille pour leur attention, leur disponibilité et leur encouragement avec un clin d'œil particulier à Jackie pour sa patience et ses relectures.

Mathieu Auclerc

Introduction

Qui douterait aujourd'hui du rôle de la régulation dans un système ?

Pour s'en convaincre, il suffit de faire l'analogie comparative avec la conduite d'une voiture qui peut être souple avec des accélérations finement dosées, mais aussi brusque avec des accélérations sans discernement. La différence de ces deux modes de conduite donnant, entre autres, une surconsommation et un vieillissement prématuré du matériel.

Ainsi, il en va de même des systèmes frigorifiques et climatiques pour lesquels les besoins doivent être en adéquation avec la production afin d'obtenir le résultat de la grandeur recherchée (température, pression, hygrométrie, etc.).

Une idée simpliste consisterait à utiliser des régulations élaborées pour obtenir des résultats dont la finesse ou l'élément commandé n'est pas en correspondance avec le but recherché.

Nous insistons sur le fait que les techniques simples sont aussi utiles que celles plus élaborées. Chaque technique doit être utilisée avec réflexion.

Il est important de noter que l'utilisation d'une technique simple ne rime pas avec une simplicité de raisonnement et peut même faire l'objet d'une recherche complexe avant sa mise en œuvre. Nous avons observé de nombreux écueils à ce sujet.

La régulation n'est pas un axe se greffant à un système mais une part entière du système qui doit impérativement s'inscrire dans un ensemble.

La maîtrise des techniques de régulation est l'élément clé d'un système, ce qui confère à l'intervenant dédié un statut particulier. Il intervient lorsque l'installation est finalisée ou en passe de l'être mais cette maîtrise nécessite de nombreuses connaissances de par la pluralité des techniques qui définissent l'ensemble du système (frigorifique, climatique, mécanique, électronique, pneumatique, informatique…).

Si les systèmes régulés peuvent faire l'objet de modélisation, il n'en reste pas moins vrai que la part liée à l'expérience reste de mise. Il est donc nécessaire d'être attentif au point de vue des aînés expérimentés sur les techniques employées. À ce niveau, la différence entre la théorie et la pratique peut être conséquente. Cependant, il ne faut pas en déduire que la théorie est inutile. Bien au contraire, l'addition des deux (théorie et pratique) permet d'optimiser les résultats.

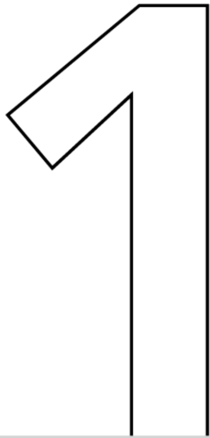
Dans cet ouvrage, nous nous sommes efforcés de décrire les méthodes des plus simples aux plus complexes. Comme indiqué précédemment, les techniques simples cachent souvent une bonne part de complexité. Nous attirons donc l'attention du lecteur sur le risque d'une lecture trop rapide sur ces points.

Nous avons émaillé cet ouvrage de remarques, qui ne sont bien entendu pas exhaustives mais qui nous paraissent les plus importantes.

Le lecteur trouvera dans ce livre la majeure partie des systèmes de régulation utilisés dans le génie frigorifique (au sens large du terme) intégrant les circuits simples, les centralisés employés dans le froid commercial mais aussi en froid industriel et dans le génie climatique. À ce titre, les techniques employées dans le froid commercial (voire ménager) n'ont rien à envier à celles utilisées en froid industriel et toute ségrégation à ce niveau ne serait pas opportune.

Enfin, nous espérons que ce modeste livre répondra aux interrogations de base des lecteurs et leur donnera envie de parfaire leur connaissance dans ce domaine.

Les Auteurs



Les types d'actions en régulation

La régulation est essentielle pour les circuits frigorifiques et permet de nombreuses actions nécessaires au fonctionnement du système. La régulation peut également compenser un certain nombre de mauvais fonctionnements liés à la conception ou à la mise en œuvre de ces circuits. Toutefois l'objectif principal est d'adapter au plus proche la production aux besoins.

Le système mis en œuvre pour la régulation est constitué principalement :

- d'un capteur (température, pression, etc.),
- d'un régulateur,
- d'un organe de réglage.

Le capteur va mesurer la grandeur à contrôler et envoyer l'information au régulateur.

Le régulateur compare l'information avec le point de consigne (grandeur souhaitée). Le résultat de cette comparaison est appelé écart ou encore erreur. Le régulateur va appliquer un algorithme de régulation à l'erreur afin de pouvoir transmettre un signal à l'organe de réglage dont la fonction est d'agir sur une capacité dans le but in fine de corriger l'erreur.

L'organe de réglage peut être une vanne de réglage, un compresseur, etc. La manière dont la grandeur mesurée est influencée par l'organe de réglage détermine le type de boucle de régulation. On distingue :

- La boucle ouverte : le capteur ne mesure pas la grandeur dans l'endroit où l'organe de grandeur agit. L'utilisation d'une boucle ouverte peut être

due à la difficulté de mesurer la grandeur régulée (chauffage central d'un immeuble avec sonde extérieure par exemple) ou à la connaissance du système régulé.

- La boucle fermée : le capteur mesure la grandeur dans l'endroit où l'organe de grandeur agit. Dans ce cas, on contrôle la grandeur souhaitée *via* l'erreur et on effectue les corrections nécessaires au fil du temps (climatisation d'une pièce avec une sonde d'ambiance par exemple).

Les régulateurs ont fortement évolué ces dernières années. Ces évolutions se sont traduites par des appareils moins chers, plus fiables et performants. Par ailleurs, des fonctions supplémentaires qui relevaient de fonctionnalités avancées sont devenues communément natives (port de communication avec les régulateurs électroniques par exemple). De même, les fournisseurs proposent une large gamme dans laquelle la quasi-globalité des algorithmes est abordée.

La figure 1.1 schématise un régulateur électronique avec une entrée et une sortie. Le régulateur peut comporter un grand nombre d'entrées et de sorties avec plusieurs algorithmes permettant ainsi des fonctions diverses telles que la régulation de la température d'une chambre froide, la gestion des dégivrages, les alarmes sur détection de seuil…

Le régulateur peut disposer de sorties supplémentaires (autres que pour l'organe de réglage) pour des fonctions telles que la recopie de lecture, l'alarme, la communication…

Dans la majorité des cas, l'algorithme utilisé est classiquement du Tout Ou Rien (TOR). L'utilisation du TOR reste simple et s'applique à un organe de réglage booléen (soit en service, soit à l'arrêt). Les régulateurs TOR sont généralement du type mécanique mais pas seulement, et cette régulation apporte dans la large majorité des cas la satisfaction désirée. Cependant, on peut être amené en fonction de l'application à utiliser d'autres lois afin de minimiser l'erreur.

On fait alors fréquemment appel à la régulation proportionnelle (P) qui commande un organe proportionnel (vanne deux voies ou trois voies par exemple).

L'avènement et la généralisation de l'électronique ont permis d'ajouter des correcteurs à la régulation proportionnelle, en la matière des fonctions intégrales (I) et dérivées (D).

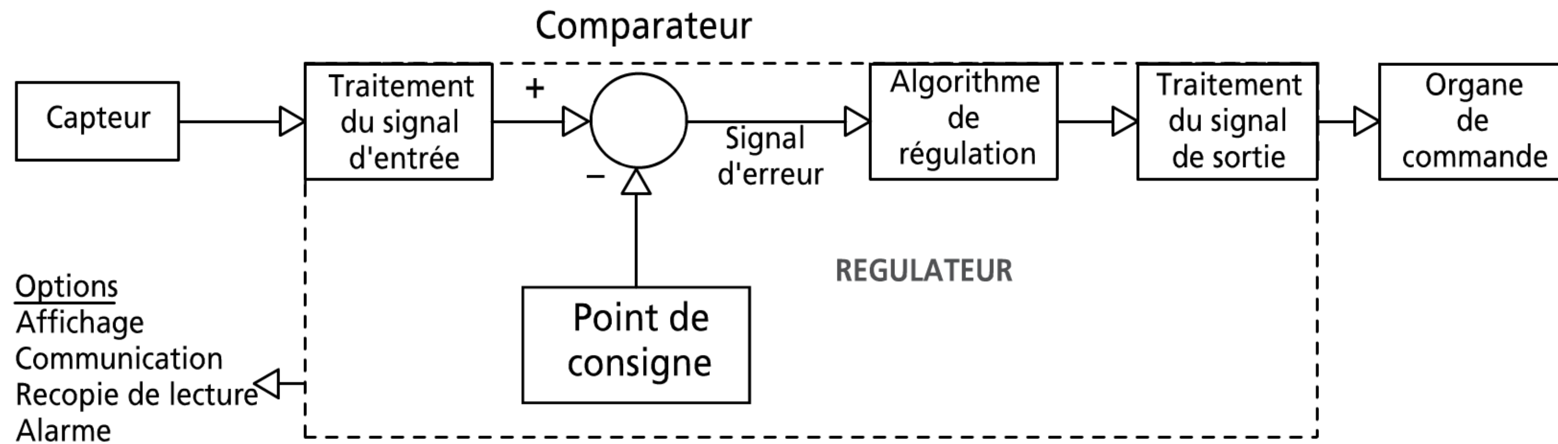


Figure 1.1 Schéma d'un régulateur à une entrée et à une sortie.

Dans certains cas (zone à risque d'explosion par exemple), on trouve des régulateurs pneumatiques. Comme leur nom l'indique, l'électricité est remplacée par un circuit d'air comprimé, ce qui supprime les sources d'ignition.

On peut rencontrer d'autres lois qui sortent du domaine de ce livre : la régulation auto-adaptative *via*, notamment, la régulation numérique par exemple.

1.1 Régulation Tout Ou Rien

La régulation Tout Ou Rien enclenche (Tout) ou arrête (Rien) l'organe de réglage. Par conséquent, on cherche à atteindre la grandeur souhaitée en utilisant l'organe de réglage entre sa capacité maximale et minimale.

Il en résulte un encadrement qui sera d'autant plus conséquent que les besoins seront disproportionnés à la production. Il est entendu qu'un réglage d'encadrement faible générera, entre autres, des courts cycles sur l'organe de réglage. Cet encadrement est appelé **différentiel**.

Le régulateur se paramètre en fixant un point de consigne et un différentiel. Le point de consigne correspond à la grandeur souhaitée (basse ou haute selon le régulateur).

La figure 1.2 montre l'évolution sinusoïdale de la grandeur en fonction du temps pour une régulation avec des caractéristiques de refroidissement.

La courbe représentant l'évolution de la grandeur dans le temps dépasse l'encadrement schématisé par les droites perpendiculaires à l'axe des abscisses.

Ce phénomène est dû aux différentes inerties du système engendrées notamment par :

- le temps de réaction du régulateur,
- le temps de réaction de l'organe de réglage et sa mise en température (à l'arrêt comme à l'enclenchement).

Par conséquent, le résultat obtenu n'est pas réellement celui souhaité.

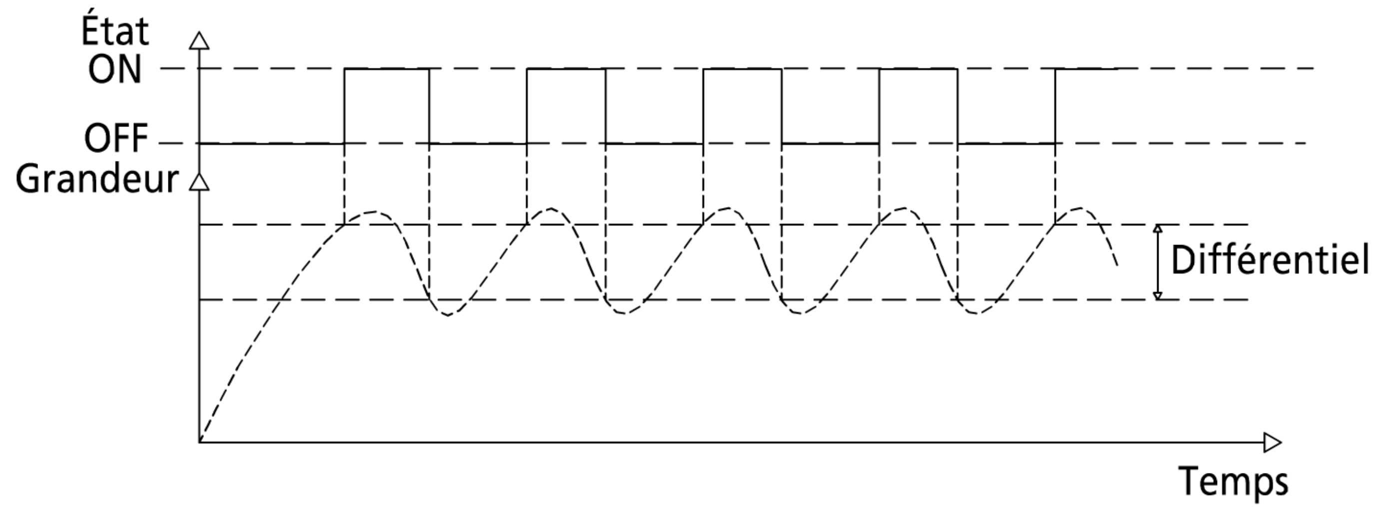


Figure 1.2 Graphe des états d’un régulateur Tout Ou Rien.

On pourrait objecter qu'une des solutions consiste à diminuer la valeur du différentiel ; cependant, cette correction n'est valable que dans la limite du pompage du système, le pompage du système générant de toute manière une oscillation de la grandeur en « stressant » l'organe de réglage. Le différentiel est donc un compromis entre l'absence de pompage et l'encadrement le plus faible de la grandeur désirée.

Il y a lieu de noter que certaines applications peuvent utiliser un différentiel conséquent intrinsèquement à leur fonctionnalité. À ce titre, on peut citer des applications avec le thermostat de fin de dégivrage (voir chapitre 9, « Dégivrage ») ou encore le réfrigérateur électroménager classique à deux compartiments sur un seul circuit frigorifique.

1.2 Action proportionnelle (P)

La régulation proportionnelle agit sur un organe qui accepte de s'adapter proportionnellement, un variateur de vitesse par exemple. On peut donc faire appel à cette régulation en fonction de l'organe à commander ou parce qu'une autre régulation (TOR par exemple) ne donne pas la satisfaction souhaitée.

L'algorithme proportionnel consiste à délivrer un signal proportionnel à l'organe de réglage en fonction de l'erreur (entre la consigne et la mesure). L'action proportionnelle est déterminée par la bande proportionnelle fixant la valeur de l'erreur pour laquelle le signal de sortie est de 100 %. Le réglage d'un régulateur proportionnel s'effectue en paramétrant le point de consigne et la bande proportionnelle (ou le gain selon le régulateur). À l'instar du différentiel de la régulation TOR, la valeur de la bande proportionnelle doit être fixée à la valeur la plus faible obtenue sans phénomène de pompage.

Majoritairement, le point de consigne est donné au signal à 0 % ; toutefois, certains fabricants considèrent que le point de consigne est à 50 % du signal. On voit toute l'importance de se référer à la documentation du fabricant pour connaître les points de réglage.

Le signal à 0 % est obtenu avec une erreur de 0. Toutefois, la valeur de 0 % est relative et ne correspond pas forcément à un signal à 0 % (le signal 4-20 mA donne 4 mA à 0 % par exemple).

La figure 1.3 indique un signal proportionnel destiné à commander une vanne trois voies sur une batterie alimentée en frigoporteur négatif. Il y a

lieu de noter que le signal croît avec l'augmentation de la grandeur mesurée : l'évolution est dite « directe » (refroidissement). Lorsque le signal décroît avec l'augmentation de la grandeur mesurée, l'évolution est dite « inverse » (chauffage).

Certains régulateurs permettent d'effectuer des évolutions directes et inverses ; d'autres ont un fonctionnement figé selon l'une ou l'autre de ces évolutions.

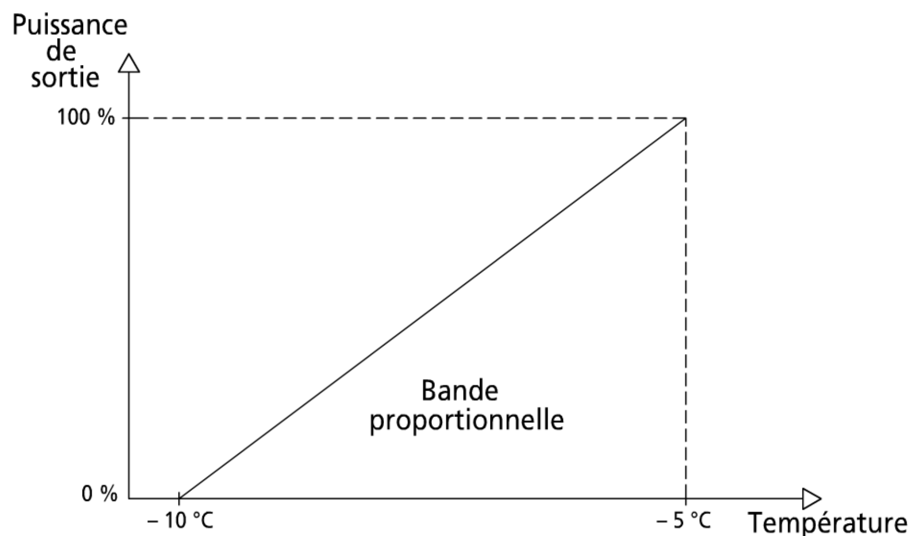


Figure 1.3 Graphe d'une régulation à action proportionnelle.

Erreur rémanente (ou statique)

La régulation proportionnelle agit en permanence proportionnellement à la valeur de l'erreur (soit en décalage). Par ailleurs, les besoins trouvent une compensation *via* la capacité de l'organe de réglage. Par conséquent, les besoins vont rentrer au fil du temps en adéquation avec la capacité de l'organe de réglage et donc figer dans le temps la valeur de l'écart.

À titre d'exemple, si on considère dans le schéma précédent que la vanne est ouverte à 50 % et qu'elle délivre exactement de quoi compenser les déperditions nécessaires, la grandeur mesurée sera figée à –7,5 °C.

Cette erreur est appelée erreur rémanente ou erreur statique et sera présente dès que les besoins seront supérieurs à 0 %. L'erreur rémanente est préjudiciable dans le cas où l'on souhaite s'approcher le plus près possible de la grandeur au signal à 0 %. Il sera donc nécessaire d'utiliser des fonctions supplémentaires pour limiter voire annihiler cette erreur.

Remarque

Si la valeur de l'erreur est supérieure à la bande proportionnelle, on peut en déduire que les besoins sont supérieurs à la capacité de la production.

1.3 Action intégrale (I)

La fonction intégrale est focalisée sur le traitement de l'erreur rémanente. Cette fonction mathématique bien connue est rendue possible grâce à l'électronique des régulateurs. L'erreur rémanente va être moyennée suivant un temps donné et un signal correctif va s'ajouter au signal proportionnel.

On cherche donc à « déstabiliser » le signal par un ajout : l'organe de réglage augmente alors sa capacité pour que l'erreur se réduise puis s'annule. Toutefois, cette action est lente et ne s'effectue qu'au fil du temps.

Le réglage de la fonction intégrale porte sur le temps d'intégration. Une valeur trop faible engendrera des instabilités du système alors qu'une valeur trop élevée annulera l'action de l'intégrale.

À noter

Il est à signaler qu'à la mise en service d'une installation, l'erreur est très élevée et risque de générer une action intégrale disproportionnée.

Cette action peut se solder par un dépassement de consigne. Aussi, afin d'éviter ce type de phénomène, les régulateurs suppriment généralement l'action de l'intégrale lorsque l'erreur est supérieure à la bande proportionnelle.

1.4 Action dérivée (D)

Si l'action de l'intégrale résout dans le temps les erreurs rémanentes liées à la régulation proportionnelle, il n'en reste pas moins qu'il s'agit toujours d'une action de correction *a posteriori*. De même, nous avons vu précédemment que

l'action proportionnelle réagit à une erreur. Il n'y a donc aucune anticipation dans le cas d'une boucle fermée et on ne réagit que face à un constat d'erreur.

La fonction dérivée a pour objet de traiter ce point en calculant, *via* le régulateur électronique, la variation dans le temps de l'erreur (fonction mathématique dérivée). Le résultat de ce calcul donne une correction au régulateur afin que l'organe de réglage fournisse plus de capacité. L'action dérivée devient nulle lorsque l'erreur devient constante.

Le réglage de la fonction porte sur le temps de dérivée. Un temps égal à 0 donnera une action nulle et un temps élevé générera une action conséquente. Compte tenu que la fonction dérivée est une action rapide due à la variation de l'erreur dans le temps, on conçoit que la représentativité de la grandeur mesurée est fondamentale.

Aussi, la mesure devra être absente de bruits parasites qui pourraient être la source d'instabilités de fonctionnement. De même, un mauvais filtrage de la grandeur mesurée rendra caduque la fonction. À l'opposé de la fonction intégrale, la fonction dérivée peut être active hors bande proportionnelle.

1.5 Action proportionnelle, intégrale et dérivée (PID)

Un régulateur PID a pour fonction les trois actions suivantes :

- proportionnelle,
- intégrale,
- dérivée.

Pour un régulateur PID, il existe plusieurs possibilités d'associer les actions intégrales et dérivées à la régulation proportionnelle. On note :

- PID série,
- PID parallèle,
- PID mixte.

Les figures 1.4 à 1.6 représentent ces différentes architectures.

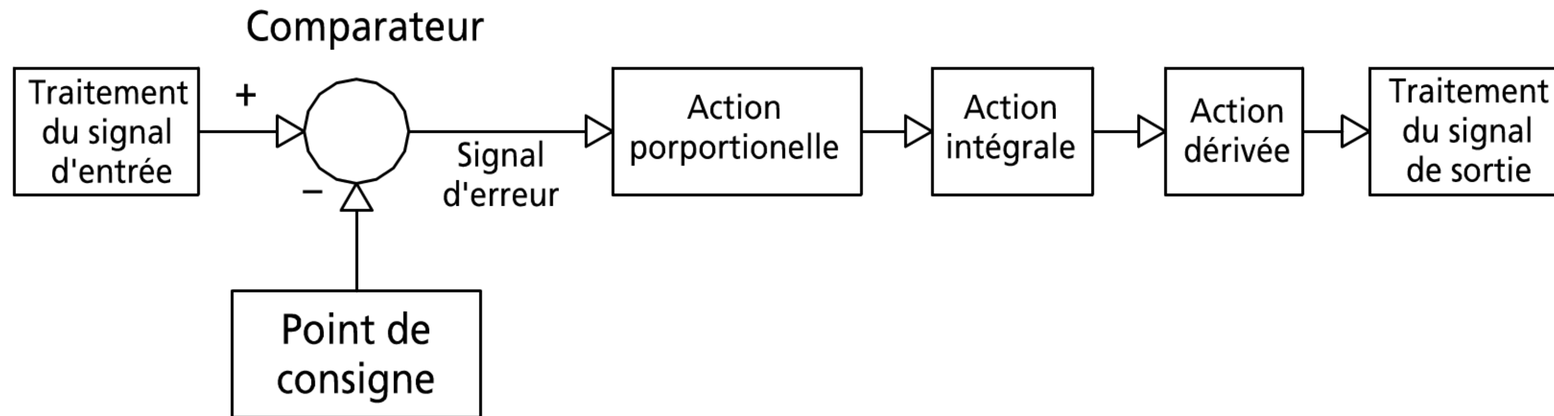


Figure 1.4 PID série.

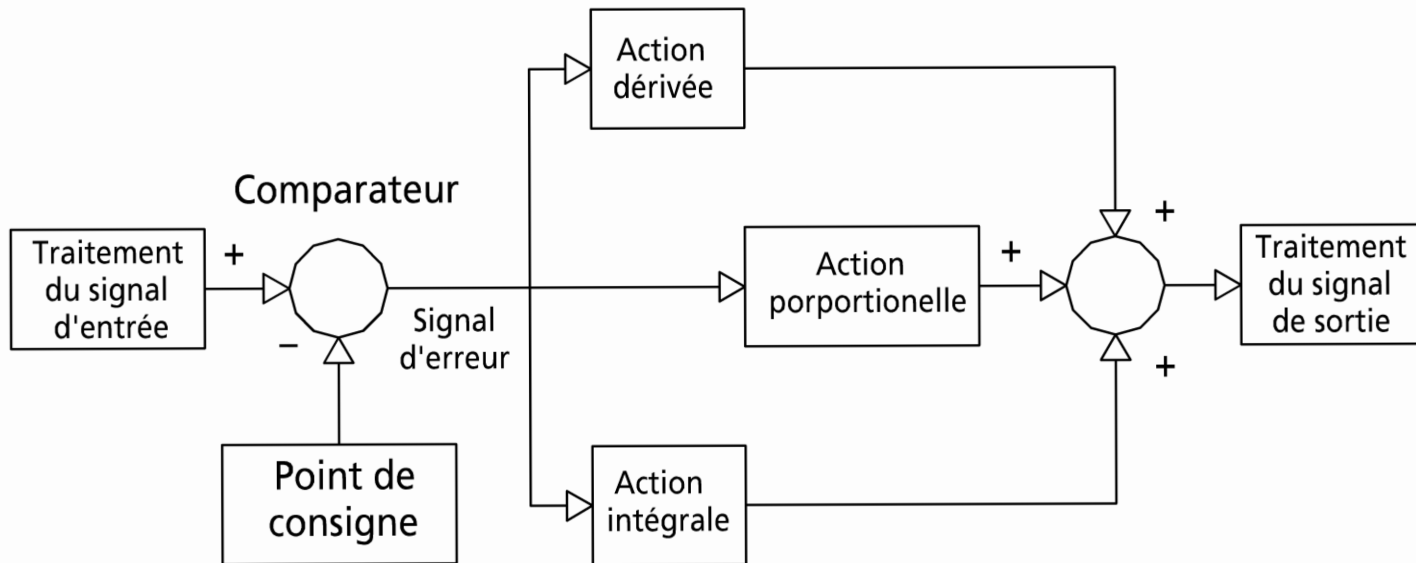


Figure 1.5 PID parallèle.

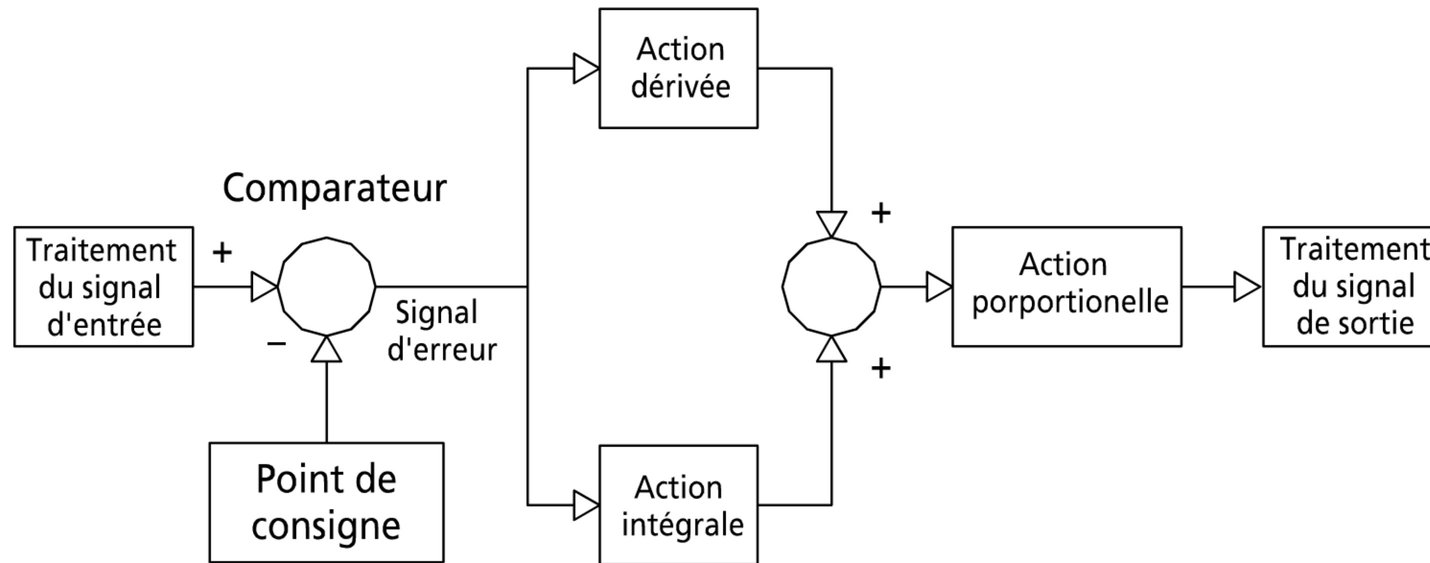


Figure 1.6 PID mixte.

1.6 Expression mathématique d’un PID mixte

1.6.1 Action proportionnelle

$$Y - C = K_{p\varphi}$$

avec :

Y = signal de sortie,

C = signal de sortie pour un écart égal à 0,

K_p = constante de proportionnalité,

φ = écart entre le point de consigne et la grandeur mesurée.

1.6.2 Action proportionnelle et intégrale

$$Y - C = K_{p\varphi} + K_p/ti \int \varphi dt$$

avec :

Y = signal de sortie,

C = signal de sortie pour un écart égal à 0,

K_p = constante de proportionnalité,

φ = écart entre le point de consigne et la grandeur mesurée,

ti = temps d’intégration.

1.6.3 Action proportionnelle, intégrale et dérivée

$$Y - C = K_p \,.\, \varphi + K_p/ti \,.\, \int \varphi dt + K_p \,.\, td.d\varphi/dt$$

avec :

Y = signal de sortie,

C = signal de sortie pour un écart égal à 0,

K_p = constante de proportionnalité,

φ = écart entre le point de consigne et la grandeur mesurée,

ti = temps d’intégration,

td = temps dérivé.

1.7 Méthode Ziegler-Nichols (boucle fermée)

La modélisation de système débouchant sur les réglages d'un PID est fastidieuse et nécessite des connaissances étendues. En pratique, les PID font souvent l'objet de réglages empiriques ou appellent à des méthodes de réglage expérimentales *in situ*.

Une de ces méthodes est celle de Ziegler-Nichols, qui se base sur la limite de pompage du régulateur. Elle consiste à régler Kc (obtenue en limite de pompage) avec Ti : + ∞ et Td : 0. On mesure alors la période Tc correspondant aux cycles de pompage obtenu (figure 1.7).

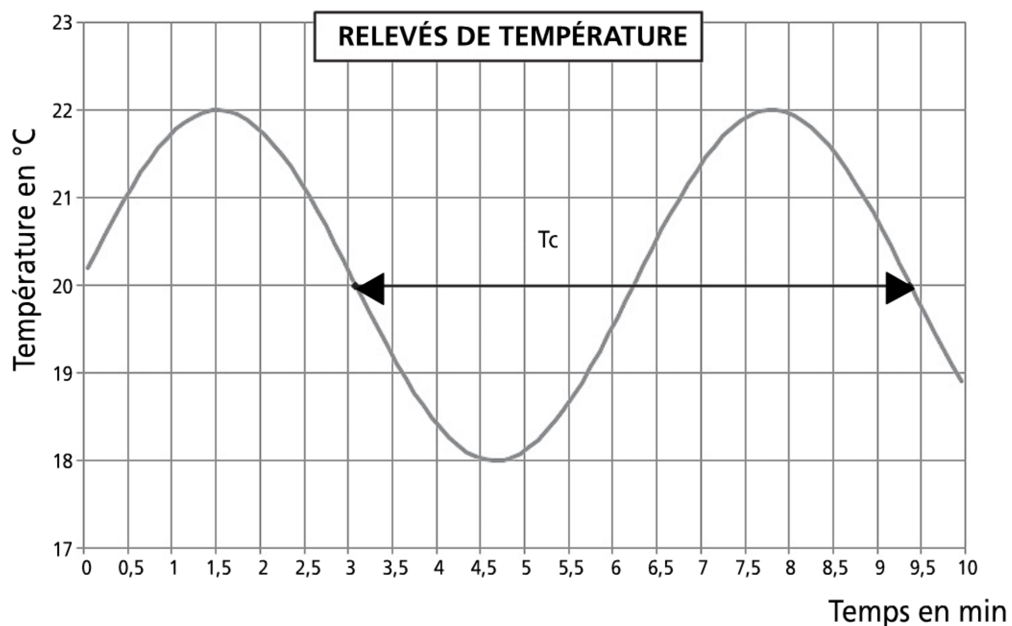


Figure 1.7 Graphe représentant la période Tc.

À l'aide de Kc et Tc, on applique les coefficients du tableau 1.1 en fonction du régulateur qui s'applique au PID mixte à paramétrer.

Tableau 1.1 Coefficients à appliquer.

Type de correcteur	Gain Kp	Ti	Td
Proportionnel	0,5 × Kc	–	–
PI	0,45 × Kc	0,83 × Tc	–
PID	0,6 × Kc	0,5 × Tc	0,125 × Tc

2 Mesures

Pour une bonne régulation frigorifique ou climatique, les mesures doivent être effectuées en permanence sur l'installation à traiter.

Ces mesures se font à l'aide de différents capteurs, allant de la sonde de température au capteur de pression…

Ce chapitre a pour objet de traiter les différents signaux de ces mesures, ainsi que les principaux types de capteurs rencontrés dans le génie frigorifique et climatique.

2.1 Signaux

Les signaux sont les valeurs de tension ou d'intensité qui rentrent, ou qui sortent, d'un régulateur ou d'un automate de programmation industriel. Les signaux proviennent de capteurs situés dans le milieu de la grandeur à mesurer ou servent à piloter des organes de réglages.

On retrouve fréquemment les signaux du type :

- tension : 0/10 V, 0/5 V, etc.,
- intensité : 0-20 mA, 4-20 mA, etc.

Les signaux en intensité sont moins sensibles à la distance (entre l'organe et le régulateur) et aux perturbations électromagnétiques. On retrouvera couramment ceux-ci en mesure de pression, ou autres, avec une préférence marquée pour le 4-20 mA, qui permet de détecter que le capteur est hors service lorsque la valeur du signal devient inférieure à 4 mA ce qui n'est pas le cas du 0-20 mA.

Il existe deux grandes familles de capteurs :

- **Les capteurs actifs** : les capteurs génèrent leur propre signal. Ils disposent de plusieurs bornes de raccordement dont deux servent à alimenter le capteur (certains régulateurs ont une borne d'alimentation commune avec une borne de signal).
- **Les capteurs passifs** : le régulateur ou l'automate génère dans ce cas le signal. Les capteurs ne disposent que de deux bornes de raccordement pour le signal.

Il est nécessaire d'être prudent dans le choix du capteur en fonction du régulateur ou de l'automate sur lequel celui-ci sera raccordé. En effet, si certains appareils sont sélectifs, soit passifs, soit actifs, d'autres nécessitent, comme dans le cas d'automate, de choisir la carte d'entrée adaptée. Par ailleurs, le raccordement diffère entre un capteur passif et un capteur actif (figure 2.1).

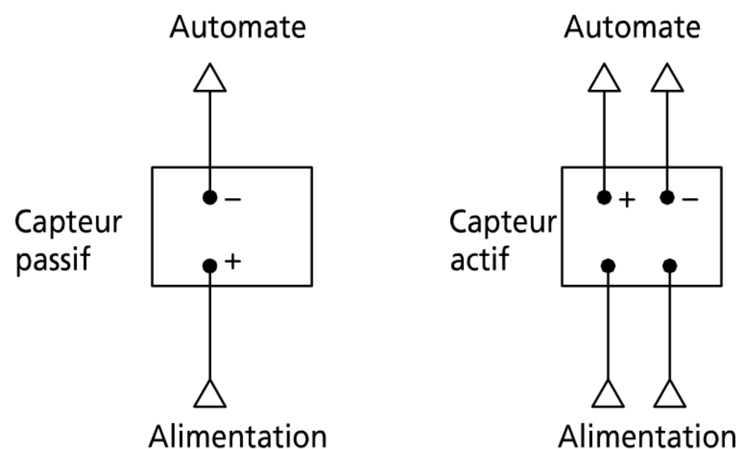


Figure 2.1 Différence entre les types de capteurs actifs et passifs.

Remarque

Cette différence est notable et essentielle dans un capteur d'intensité.

2.2 Capteurs

Les capteurs sont essentiels à la régulation. Ils vont servir à mesurer la grandeur à réguler et transmettre le signal à l'organe comparateur.

La précision obtenue de la valeur régulée est une chaîne comprenant le capteur, le comparateur, l'organe de commande sans omettre les lois adéquates pour obtenir un bon résultat. Toutefois, cette chaîne commence par le début, c'est-à-dire le capteur, et le résultat obtenu ne peut pas être optimum si le capteur choisi ne convient pas dans l'utilisation que l'on souhaite en faire et ce, notamment, en ce qui concerne sa plage.

2.2.1 Température

Thermocouples

Le thermocouple est constitué de deux conducteurs de métaux différents. Sous l'action d'un gradient thermique, ces métaux génèrent un mouvement d'électron qui engendre une force électromotrice. L'amplitude et la direction de cette force électromotrice dépendront de la température et du matériau constituant le thermocouple.

Les deux conducteurs sont soudés à une extrémité (appelée **jonction chaude**) où l'on souhaite effectuer la mesure. Les deux autres extrémités sont raccordées à l'élément mesurant la force électromotrice (figure 2.2).

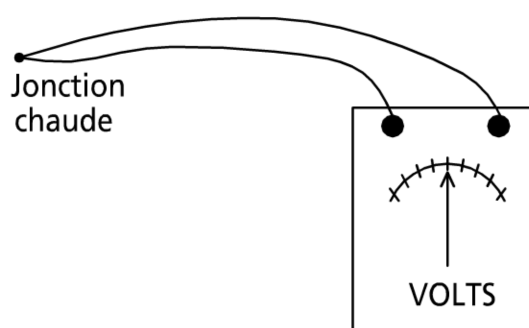


Figure 2.2 Principe du thermocouple sur un galvanomètre.

Les thermocouples permettent une large échelle de température et une souplesse dans leur présentation. Par ailleurs, la constante de temps est relativement faible et la mesure précise car elle est facilement localisable à la jonction chaude.

L'inconvénient majeur de ce type de sonde réside dans le besoin d'avoir une compensation de température et de nécessiter des câbles d'extension pour les mesures de grande longueur. Il est impératif que les câbles d'extension soient réalisés dans le même matériau que le thermocouple, toutefois, dans certains cas d'utilisation en plage de température réduite, ces câbles peuvent être de matériaux différents spécialement étudiés afin d'obtenir une compensation de température.

Les matériaux utilisés pour les thermocouples doivent posséder une bonne stabilité volt/kelvin sur une plage de mesure étendue. Les constructeurs ont sélectionné plusieurs combinaisons de conducteur pouvant couvrir une plage de –20 °C à + 2 000 °C. Cependant, plusieurs thermocouples seront nécessaires pour couvrir cette plage.

Les matériaux utilisés sont généralement constitués d'alliages de platine, rhodium, nickel, chrome et cuivre.

Les tensions obtenues sont de l'ordre d'un à quelques dizaines de microvolts et ces valeurs varient plus au moins sur l'étendue de la plage du thermocouple.

Les thermocouples existent sous différentes formes de présentation : sonde à piquer, sonde à contact, sonde à enrouler, etc. Ils sont désignés par des lettres données par convention internationale (tableau 2.1).

Étant donné qu'un thermocouple est un générateur électrique, la tension qu'il développe peut être utilisée pour alimenter un microvoltmètre.

Cette méthode de mesure était utilisée il y a quelques années. Elle consistait à utiliser un microvoltmètre dont la graduation était modifiée afin d'afficher directement la température.

La température des points de connexion du thermocouple au microvoltmètre faisait office de température de référence et il était nécessaire de compenser cette température pour ramener la mesure à une référence de 0 °C.

Plusieurs méthodes de compensation étaient possibles : soit de façon mécanique en modifiant la position de l'échelle de lecture par exemple, soit de façon électrique en envoyant une tension en opposition dans le circuit de mesure.

Tableau 2.1 Désignation internationale des thermocouples.

Désignation	Matériaux		Tension (mV/K)*			Plage de température en °C
	Polarité (+)	Polarité (–)	100 °C	500 °C	1 000 °C	
R	Pt-13 % RH	Pt	8	10	13	0 à + 1 600
S	Pt-10 % RH	Pt	8	9	11	0 à + 1 550
B	Pt-30 % RH	Pt-6 % RH	1	5	9	+ 100 à + 1 600
K	Ni-Cr	Ni-Al	42	43	39	0 à + 1 100
T	Cu	Cu-Ni	46	/	/	– 100 à + 300
J	Fe	Cu-Ni	46	56	/	+ 20 à + 700
E	Ni-Cr	Cu-Ni	68	81	/	0 à + 800

* Jonction froide compensée à 0 °C.

Aujourd'hui, les énormes progrès réalisés en électronique permettent de disposer à faible coût d'appareils à affichage numérique de très haute résolution et à compensation électronique intégrée.

Résistances

La résistance que présentent les conducteurs électriques est fonction de leur température. Cependant, l'exploitation de cette caractéristique en thermométrie suppose que ce rapport est conséquent et qu'il est linéaire sur la plage de température concernée. C'est le cas notamment du platine qui, bien qu'étant coûteux, ne rentre en jeu dans le capteur que pour des quantités faibles.

Pour que la résistance soit précise, la condition importante est que l'élément platine reste à l'état recuit en permanence. Ce paramètre conduit les fabricants à intégrer l'élément sensible dans une protection mécanique à l'abri des chocs et des vibrations. Toutefois, et ce notamment vis-à-vis des vibrations, les conditions d'installation devront respecter cette contrainte.

Remarque

Dans les sondes platine, l'élément sensible nécessite d'être manié avec soin.

Les valeurs des sondes sont normalisées en termes de valeur (tableau 2.2) et de précision. On trouve principalement dans le commerce les PT100 et les PT1000 (le chiffre indiquant la valeur de la résistance ohmique à 0 °C).

La différence notable de ces deux types de sondes porte sur l'influence de la résistance additionnelle de la ligne. Ainsi, avec l'utilisation d'une sonde PT1000, la résistance ohmique de 3 ohms des conducteurs de raccordement, représente 1 K alors que dans le cas d'une résistance PT100, cette même valeur donne 8 K.

Il est à noter que :

- 100 m de câble 0,75 mm^2 donnent une résistance classique de 2,4 ohms,
- 100 m de câble 1,5 mm^2 donnent une résistance classique de 1,2 ohm,
- 100 m de câble 2,5 mm^2 donnent une résistance classique de 0,7 ohm.

Le type de sonde et la méthode utilisée pour effectuer des mesures avec les sondes dépendent de la précision recherchée.

Le pont de Wheatstone est, avec une sonde à deux fils (figure 2.3), classiquement utilisé pour une précision standard.

Pour la recherche de précision plus grande, on utilisera une sonde à trois fils (figure 2.4) ou à quatre fils (figure 2.5).

La constante de temps de ce type de capteur est importante.

Tableau 2.2 Valeurs de résistance des sondes PT100 et PT1000 en fonction de la température.

PT 100				PT 1000			
°C	Ohm	°C	Ohm	°C	Ohm	°C	Ohm
0	100,0	0	100,0	0	1 000,0	0	1 000,0
1	100,4	– 1	99,6	1	1 003,9	– 1	996,1
2	100,8	– 2	99,2	2	1 007,8	– 2	992,2
3	101,2	– 3	98,8	3	1 011,7	– 3	988,3
4	101,6	– 4	98,4	4	1 015,6	– 4	984,4
5	102,0	– 5	98,1	5	1 019,5	– 5	980,4
6	102,3	– 6	97,7	6	1 023,4	– 6	976,5
7	102,7	– 7	97,3	7	1 027,3	– 7	972,6
8	103,1	– 8	96,9	8	1 031,2	– 8	968,7
9	103,5	– 9	96,5	9	1 035,1	– 9	964,8
10	103,9	– 10	96,1	10	1 039,0	– 10	960,9
11	104,3	– 11	95,7	11	1 042,9	– 11	956,9
12	104,7	– 12	95,3	12	1 046,8	– 12	953,0
13	105,1	– 13	94,9	13	1 050,7	– 13	949,1
14	105,5	– 14	94,5	14	1 054,6	– 14	945,2
15	105,9	– 15	94,2	15	1 058,5	– 15	941,2
16	106,2	– 16	93,8	16	1 062,4	– 16	937,3
17	106,6	– 17	93,4	17	1 066,3	– 17	933,4
18	107,0	– 18	93,0	18	1 070,2	– 18	929,5
19	107,4	– 19	92,6	19	1 074,0	– 19	925,5
20	107,8	– 20	92,2	20	1 077,9	– 20	921,6
21	108,2	– 21	91,8	21	1 081,8	– 21	917,7
22	108,6	– 22	91,4	22	1 085,7	– 22	913,7
23	109,0	– 23	91,0	23	1 089,6	– 23	909,8
24	109,4	– 24	90,6	24	1 093,5	– 24	905,9
25	109,8	– 25	90,2	25	1 097,3	– 25	901,9

Tableau 2.2 Valeurs de résistance des sondes PT100 et PT1000 en fonction de la température *(suite)*.

PT 100				**PT 1000**			
°C	**Ohm**	**°C**	**Ohm**	**°C**	**Ohm**	**°C**	**Ohm**
26	110,1	– 26	89,8	26	1 101,2	– 26	898,0
27	110,5	– 27	89,4	27	1 105,1	– 27	894,0
28	110,9	– 28	89,0	28	1 109,0	– 28	890,1
29	111,3	– 29	88,6	29	1 112,8	– 29	886,2
30	111,7	– 30	88,2	30	1 116,6	– 30	882,2
31	112,1	– 31	87,8	31	1 120,6	– 31	878,3
32	112,5	– 32	87,4	32	1 124,5	– 32	874,3
33	112,9	– 33	87,0	33	1 128,3	– 33	870,4
34	113,3	– 34	86,6	34	1 132,2	– 34	866,4
35	113,7	– 35	86,2	35	1 136,1	– 35	862,5
36	114,0	– 36	85,9	36	1 139,9	– 36	858,5
37	114,4	– 37	85,5	37	1 143,8	– 37	854,6
38	114,8	– 38	85,1	38	1 147,7	– 38	850,6
39	115,2	– 39	84,7	39	1 151,5	– 39	846,7
40	115,6	– 40	84,3	40	1 155,4	– 40	842,7
41	115,9	– 41	83,9	41	1 159,3	–41	838,8
42	116,3	– 42	83,5	42	1 163,1	– 42	835,0
43	116,7	– 43	83,1	43	1 167,0	– 43	830,8
44	117,1	– 44	82,7	44	1 170,8	– 44	826,9
45	117,5	– 45	82,3	45	1 174,7	– 45	822,9
46	117,8	– 46	81,9	46	1 178,5	– 46	818,9
47	118,2	– 47	81,5	47	1 182,4	– 47	815,0
48	118,6	– 48	81,1	48	1 186,3	– 48	811,0
49	119,0	– 49	80,7	49	1 190,1	– 49	807,0
50	119,4	– 50	80,3	50	1 194,0	– 50	803,1

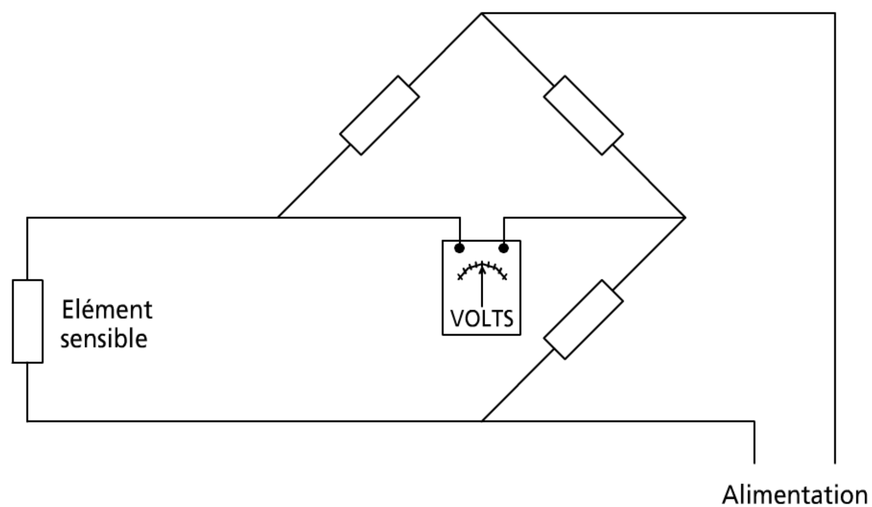


Figure 2.3 Sonde deux fils.

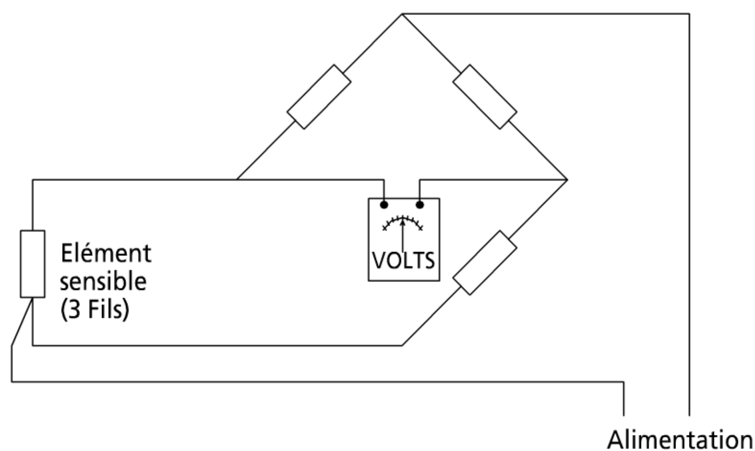


Figure 2.4 Sonde trois fils.

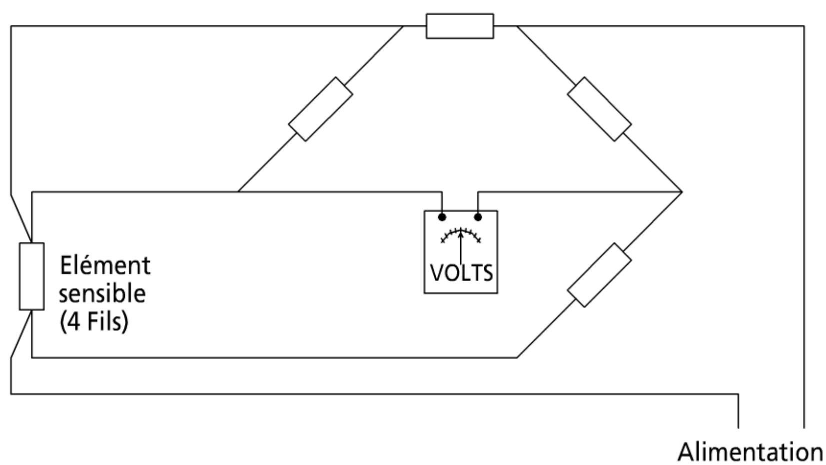


Figure 2.5 Sonde quatre fils.

Thermistances

Les thermistances sont fréquemment employées dans l'industrie frigorifique pour de la mesure, de la régulation et de la sécurité. C'est un composant électronique bon marché et dont les formes sont très variables : nus, disques, barrettes, ampoule de verre…

On rencontre deux sortes de thermistances :

- **CTP** : leurs résistances s'élèvent avec l'augmentation de température,
- **CTN** : leurs résistances diminuent avec l'augmentation de température.

L'évolution de la résistance en fonction de la température n'est ni linéaire (échelle logarithmique) ni constante (figure 2.6). Elle nécessite de ce fait une linéarisation électronique dans la plage d'utilisation.

Notons que l'emploi classique d'une CTP comme protection d'un moteur électrique de compresseur donne une sécurité positive : la coupure de la sonde donne une résistance infinie, ce qui coupe le contact du relais de surchauffe.

Remarque

On note que l'usage d'une CTN donnerait une sécurité négative.

La constante de temps

Toutes les sondes ont des temps de réponse dont on doit tenir compte lorsque la température du milieu se modifie dans le temps. Le temps de réponse de la sonde, qui dépend de sa fabrication, est baptisé « **tau** ». La valeur de tau est définie par l'expression :

$$\tau = M \,.\, Cp/K \,.\, S$$

avec :

K = coefficient d'échange,

S = surface d'échange de la sonde,

M = masse de la sonde,

Cp = capacité calorifique des matériaux de la sonde.

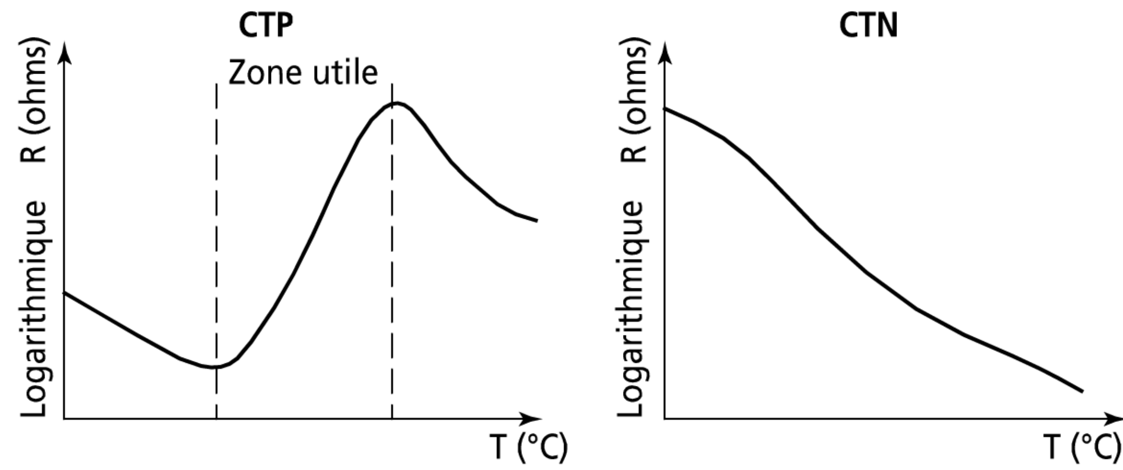


Figure 2.6 Graphes de l'évolution de la résistance en fonction de la température.

Par ailleurs, on sait que :

$$Q = K.S.(\theta_f - \theta_x) = M.Cp.d\theta_x / dt$$

θ_f = température du fluide mesuré,

θ_x = température de la sonde à t_x,

θ_0 = température de la sonde à t_0.

On pose :

$$y = \theta_f - \theta_x$$
$$y' = - \theta_{x'}$$

On obtient donc :

$$- \tau y' = y$$

$$y'/y = -1/ \tau$$

$$y = C.e^{-t/\tau} = \theta_f - \theta_x$$

soit à t = 0, on a $\theta_x = \theta_0$ d'où $C = \theta_f - \theta_0$

d'où $\theta_f - ((\theta_f - \theta_0) / e^{t/\tau})$

On voit que la température de la sonde n'atteindra jamais réellement la température du fluide dans laquelle la sonde se trouve.

Or si $t = \tau$

$$\theta_x = \theta_f - ((\theta_f - \theta_0)/e)$$

$$\text{soit } (\theta_x - \theta_0) / (\theta_f - \theta_0) = (e - 1)/e \text{ soit } 0{,}632$$

Remarque

Tau représente le temps mis par la sonde pour atteindre 63,2 % de la valeur de changement de température. On estime que la valeur de la sonde est atteinte au bout de 5 tau, ce qui représente 99,3 % de la valeur de changement.

La masse et la chaleur massique du capteur sont imposées par la fabrication de la sonde ; toutefois, la résistance thermique est accessible, notamment vis-à-vis du positionnement de la sonde et des résistances de contact interposées entre l'élément sensible du capteur et les intermédiaires avec le milieu à mesurer.

Il y a lieu de noter que dans certaines applications, le temps de réponse est artificiellement augmenté afin d'accroître la stabilité de la régulation et d'éviter les contre-réactions inutiles.

Quelques valeurs de τ

- 3 à 30 secondes pour un liquide,
- 25 à 100 secondes pour de l'air.

La mise en œuvre

La mise en œuvre de la sonde est essentielle pour obtenir le but escompté.

Le positionnement doit être représentatif de la grandeur mesurée et bénéficier du coefficient de convection optimum du milieu contrôlé afin d'obtenir un temps de réponse faible.

Par exemple, le montage d'une sonde dans une tuyauterie doit s'effectuer dans la veine principale du fluide.

Dans le cas d'utilisation de doigt de gant, il est nécessaire d'utiliser une pâte de contact afin de réduire les résistances parasites. Par ailleurs, les doigts de gant utilisés en réfrigération doivent faire l'objet du plus grand soin afin d'éviter leurs ruptures par éclatement lié à la glace. Une des solutions à proscrire est l'utilisation d'huile pour remplir ceux-ci.

Remarque

Dans le cas d'un doigt de gant à température négative, on effectuera une obturation hermétique de ce dernier.

2.2.2 Pression

Les capteurs de pression sont très utilisés dans l'industrie frigorifique. On en trouve du côté HP et du côté BP et ils servent à la régulation ainsi qu'à la sécurité.

Les capteurs utilisés dans l'industrie frigorifique doivent être compatibles avec les fluides frigorigènes et avec les lubrifiants employés.

Les capteurs rencontrés sont du type à cellule fermée où le fluide contrôlé est situé d'un côté d'une membrane. De l'autre coté se trouve un fluide en contact (par exemple de l'huile silicone) avec un élément sensible.

Lors d'une augmentation de pression du fluide contrôlé, la membrane séparative se déplace, ce qui diminue ou augmente la pression du fluide emprisonné sur l'élément sensible. L'élément sensible convertit la variation de pression en signal électrique (figure 2.7).

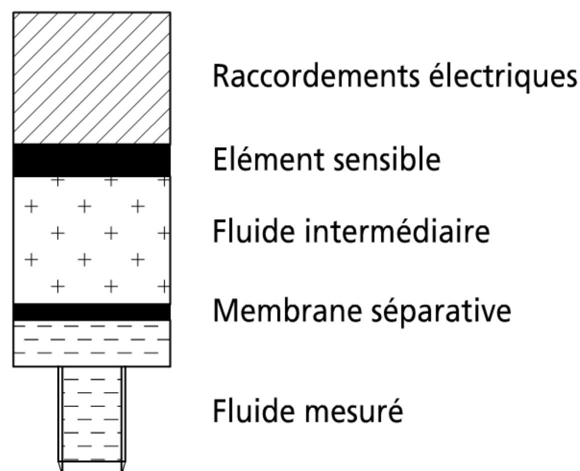


Figure 2.7 Schéma de principe d'un capteur de pression.

Les cap.teurs de pression utilisés sont couramment en intensité 4-20 mA et en tension 1/5 V ou 0/10 V. Le signal de sortie est linéaire, selon la tolérance et l'hystérésis, à la plage du capteur.

Toutefois, on rencontre des capteurs dits « ratiométriques » où le signal de sortie est un pourcentage de la tension d'alimentation : par exemple pour une tension d'alimentation de 10 V :

- signal minimum 10 % de la tension d'alimentation : 1 V,

- signal maximum 90 % de la tension d'alimentation : 9 V.

Les pourcentages minimum et maximum dépendent du capteur employé.

Remarque

Les capteurs sont compensés dans une plage de température donnée. Aussi un capteur dédié à la mesure de haute pression frigorifique devra être compensé dans une plage de température haute alors qu'un capteur pour des mesures de basse pression frigorifique devra être compensé dans une plage de température basse.

2.2.3 Niveau de liquide

Il existe un grand nombre de contrôleurs de niveau dans l'industrie. Citons quelques exemples :

- à flotteur,
- à plongeur,
- à palpeur,
- à pression,
- à bulle,
- à sonde conductrice,
- par électrode,
- optoélectronique,
- capacitif,
- ultrasons,
- radar.

On retrouve fréquemment en réfrigération :

- contrôleur à flotteur,
- contrôleur par électrode,
- contrôleur optoélectronique.

Contrôleur à flotteur

Il s'agit d'un flotteur mû par le liquide du niveau à contrôler. Le flotteur peut être :

- soit raccordé à un aimant qui enclenchera les contacts (mini et/ou maxi) *via* la force du champ magnétique généré à sa proximité (figure 2.8),
- soit raccordé à un noyau évoluant à l'intérieur d'une bobine et utilisant le principe de Hall (figure 2.9).

Le premier type est couramment utilisé pour des niveaux de sécurité (niveau haut bouteille BP, niveau bas séparateur d'huile, etc.).



Figure 2.8 Contrôleur à flotteur (type aimant) (Doc. US RECO).



Figure 2.9 Contrôleur à flotteur (type noyau) (Doc. Kubler France SA).

On trouve fréquemment les contrôleurs à flotteur pour la régulation des niveaux d'huile des compresseurs à pistons (figure 2.10). Dans ce cas, le flotteur est relié directement à un pointeau qui obture le passage d'huile à la montée de niveau. Il est à noter que ce régulateur est particulièrement sensible au delta P d'huile.



Figure 2.10 Contrôleur à flotteur pour régulation de niveau d'huile (Doc. HENRY).

Une alternative de plus en plus usitée pour cette application consiste à remplacer ces contrôleurs à flotteur par des appareils électroniques (figure 2.11). Ces contrôleurs électroniques s'apparentent plus à des régulateurs qu'à des contrôleurs de par les différentes fonctions qui y sont associées :

- alarme niveau bas et niveau haut,
- gestion du niveau d'huile en agissant sur une vanne solénoïde d'alimentation d'huile,
- alarme du temps de remplissage d'huile trop long,
- temporisation d'injection.



Figure 2.11 Contrôleur électronique (type Traxoil) (Doc. ALCO).

Remarque

Ce type de contrôleur supporte de forts delta P d'injection.

Contrôleur par électrode

L'élément contrôleur est constitué de deux électrodes. Les deux électrodes sont soumises à une basse tension afin d'éviter les électrolyses. Lorsque les électrodes sont en contact ou hors contact avec le liquide à contrôler, l'intensité varie. Cette intensité est mesurée par un circuit électronique qui actionne un contact électrique.

Remarque

Le niveau contrôlé peut dépendre fortement de la position des électrodes (horizontales, verticales ou intermédiaires) dans l'élément de détection. Pour éviter ce problème, l'élément de détection comporte fréquemment un repère de montage.

Contrôleur optoélectronique

La sonde contient une diode électroluminescente (émetteur de lumière), un phototransistor (récepteur) et l'électronique correspondante (figure 2.12). La sonde est constituée d'une pointe conique agissant comme un prisme. Le rayon émis par la diode située d'un côté de la tête de la sonde, est réfléchi vers le phototransistor situé de l'autre côté de la tête si le prisme est situé dans l'air. Le rayon est réfracté dans le liquide si la sonde est immergée.



Figure 2.12 Contrôleur optoélectronique (Doc. US RECO).

Le circuit électronique actionne un contact électrique en fonction de la réfraction des rayons.

On retrouve ce type de capteur pour des applications d'alarme de niveau de fluide frigorigène (réserve liquide par exemple).

Remarque

Dans l'utilisation d'un détecteur optoélectronique pour le contrôle de niveau d'huile d'un carter de compresseur à pistons, le capteur peut être plus ou moins sensible à l'émulsion.

2.2.4 Hygrométrie

Les capteurs d'hygrométrie sont composés d'un élément sensible en polymère à base de silicone qui utilise le principe de mesure capacitif (figure 2.13). Ces capteurs intègrent une sonde de température ce qui permet de réaliser une compensation sur une échelle donnée donnant ainsi une précision de l'ordre de ± 2 %.

On utilise des solutions salines pour ré-étalonner périodiquement le capteur.

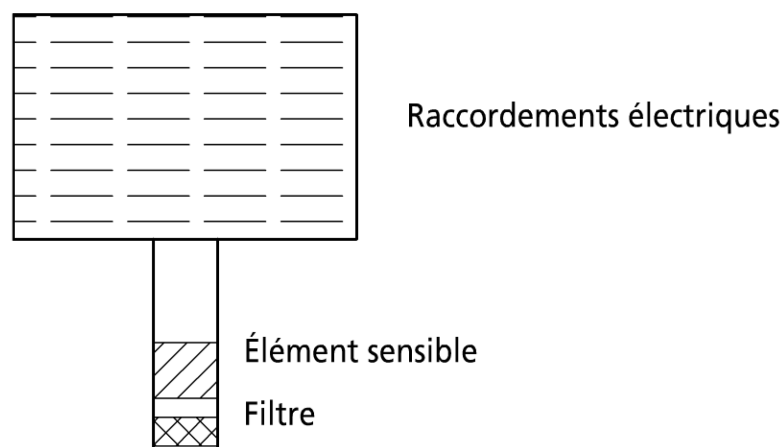


Figure 2.13 Schéma de principe d'un capteur d'hygrométrie.

À noter

Il existe d'autres catégories d'appareils permettant de mesurer la température de rosée avec une tolérance sur la plage concernée de ± 1 %.

2.2.5 Débitmètre

Les débitmètres se sont généralisés ces dernières années avec, d'une part, l'augmentation des installations à frigoporteur, et d'autre part, l'accroissement des équipements de métrologie des installations.

Les débitmètres sont soit volumiques, soit massiques, soit les deux à la fois. Ils peuvent être dédiés exclusivement ou non à des liquides, des vapeurs ou des gaz.

La liste ci-après, non exhaustive, indique quelques débitmètres volumiques et massiques couramment utilisés dans l'industrie.

Dans les **débitmètres volumiques**, on trouve :

- les débitmètres ultrasoniques (liquide),
- les débitmètres à Coriolis (liquide, vapeur et gaz),
- les débitmètres à Venturi (liquide, vapeur et gaz),
- les débitmètres à vortex (liquide, vapeur et gaz),
- les débitmètres électromagnétiques (liquide),
- les débitmètres à turbine (liquide, vapeur et gaz),
- les débitmètres à tube Pitot (liquide, vapeur et gaz).

Les débitmètres volumiques sont destinés à mesurer et/ou contrôler le débit volumique dans l'installation classique alors que, dans le cas du débitmètre massique, leur utilisation est principalement liée au domaine de la métrologie de laboratoire ou d'applications pour lesquelles une grande précision est requise.

Dans les **débitmètres massiques**, on trouve :

- les débitmètres à Coriolis (liquide, vapeur et gaz),
- les débitmètres à vortex (liquide, vapeur et gaz),
- les débitmètres massiques thermiques (gaz).

L'objet du présent document n'étant pas d'effectuer une explication complète de tous les débitmètres existants, nous détaillerons cependant certains d'entre eux.

Les débitmètres ultrasoniques (liquide)

Ce type de débitmètre est fréquemment utilisé pour faire de la mesure d'audit car il s'agit d'une mesure non intrusive et dont la mise en place est relativement facile.

Le principe de fonctionnement se base sur deux capteurs positionnés à l'extérieur de la conduite où circule le fluide dont on souhaite mesurer le débit. Un ultrason est envoyé dans les deux sens d'un capteur à l'autre. La différence des temps de propagation des ondes d'un sens à l'autre est directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement.

En connaissant le diamètre du tube et la vitesse du son dans le fluide mesuré, on détermine la vitesse. La difficulté de cette mesure réside souvent dans la connaissance de la vitesse du son dans le fluide mesuré.

Les débitmètres à Coriolis (liquide, vapeur et gaz)

Ce débitmètre est très répandu dans l'industrie agroalimentaire, la pharmacopée, la chimie, la pétrochimie, etc.

Il permet, grâce à son intégrateur de compensation de température, d'obtenir des mesures supplémentaires (température, débit volumique…).

Comme tout élément incorporé dans un circuit contenant un fluide en circulation, il faudra tenir compte de la perte de charge du débitmètre, de sa résistance à la pression, de la température d'emploi et du débit le traversant.

La force de Coriolis est générée lorsqu'un système est simultanément soumis à des mouvements de translation et de rotation. Dans le débitmètre, la vitesse de rotation est remplacée par une fréquence d'oscillation constante.

$$Fc = 2 \,.\, \Delta m \,.\, (\omega \,.\, v)$$

avec :

Fc = force de Coriolis,

Δm = masse déplacée,

ω = vitesse de rotation,

v = vitesse radiale dans le système en rotation ou en oscillation.

La force de Coriolis dépend de la masse déplacée et de sa vitesse soit du débit massique. Ce type d'appareil donne des mesures précises (de l'ordre de ± 0,1 % en débit massique).

Les débitmètres à vortex (liquide, vapeur et gaz)

Le principe de mesure est basé sur le cheminement des tourbillons selon Karman. Lorsqu'un fluide passe sur un corps perturbateur, des tourbillons se forment sur les côtés et se détachent sous l'effet de l'écoulement. La fréquence de détachement de ces tourbillons est proportionnelle à la vitesse de passage moyenne et de ce fait au débit volumique pour un Reynolds > 3 800.

Les variations de pression générées par les tourbillons sont transmises *via* des orifices latéraux aux corps perturbateurs. L'appareil contient un capteur qui convertit les différences de pression en impulsions électriques.

Fréquence de détachement des tourbillons : St . v / d

avec :

St = nombre de Strouhal,

v = vitesse d'écoulement,

d = largeur du corps perturbateur.

Les impulsions électriques sont transformées en signal de sortie.

Les débitmètres électromagnétiques (liquide)

Il s'agit des débitmètres volumiques les plus utilisés dans l'industrie car ils associent la précision avec un coût relativement bon marché. Ils sont utilisés pour toutes les mesures avec des fluides conducteurs, car la technique repose sur le principe de la loi électromagnétique de Faraday.

Le liquide représente le conducteur en déplacement dans le champ magnétique. La tension induite, proportionnelle à la vitesse d'écoulement, est transmise à l'amplificateur par le biais de deux électrodes. Le convertisseur électronique transforme la tension en un signal de sortie (figure 2.14).

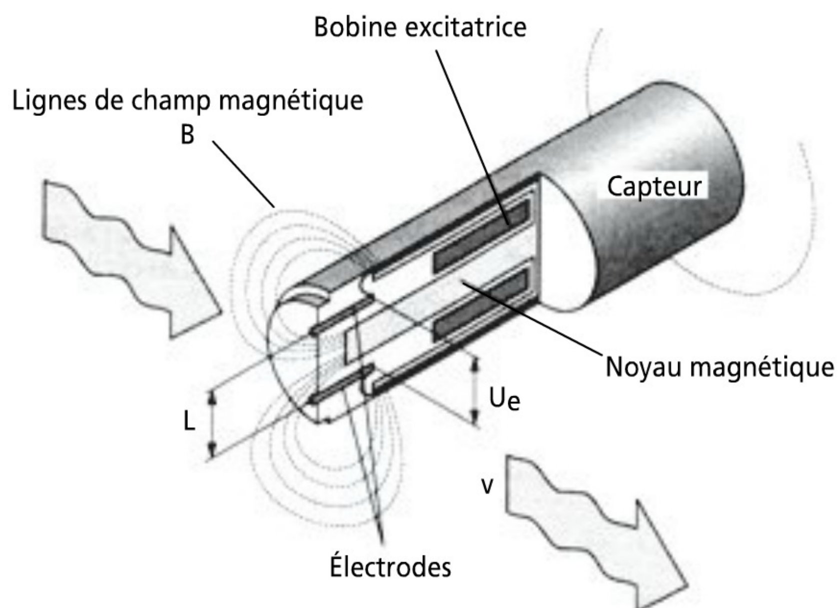


Figure 2.14 Débitmètre électromagnétique (Doc. Endress+Hauser).

3 Les organes mécaniques de régulation

Les organes mécaniques de régulation sont un grand classique des installations frigorifiques. Certains de ces appareils ont une conception éprouvée depuis plusieurs décennies. Ils peuvent être utilisés dans un rôle de sécurité ou de régulation.

On distingue les appareils dédiés à la sécurité ou à la régulation en fonction du point de consigne pour l'action donnée. Ainsi, un appareil dont le point de consigne est le point de coupure porte le nom d'appareil à **arrêt constant** : il est généralement destiné à la sécurité. En revanche, lorsque le point de consigne est l'enclenchement, on appelle l'appareil à **départ constant** et on l'affecte généralement à la régulation (figure 3.1).

Les appareils de sécurité peuvent être à réarmement automatique ou manuel. Dans ce dernier cas, il faudra une action manuelle (réarmement) pour désarmer l'accrochage mécanique du contact électrique.

Remarque

On peut utiliser un appareil de sécurité pour une application de régulation si l'appareil est à réarmement automatique. Toutefois, il est nécessaire de réaliser les réglages en conséquence.

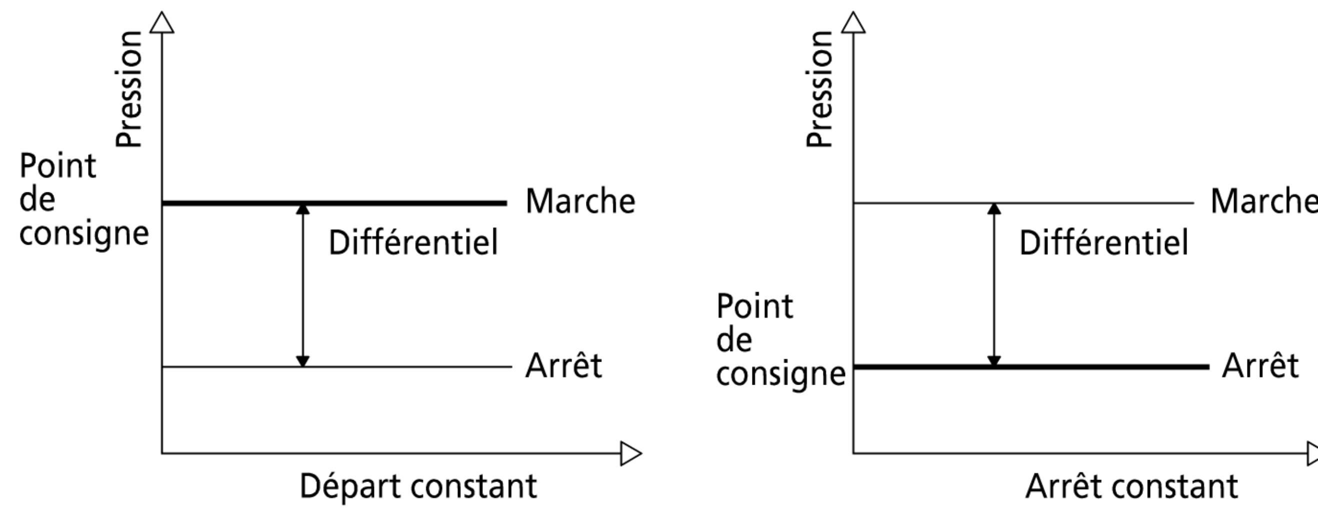


Figure 3.1 Action des consignes suivant les appareils.

Comme tout appareillage électrique, il est impératif de vérifier l'intensité maximale admissible par le contact électrique selon l'application en :

- courant alternatif inductif (un moteur par exemple) ou ohmique (une résistance par exemple),
- courant continu.

Outre l'aspect pouvoir de coupure, ces données influeront directement sur la durée de vie du contact. Par ailleurs, les boîtiers de l'appareil possèdent une classification d'étanchéité permettant de choisir le degré désiré selon l'application voulue.

3.1 Thermostat

Le thermostat peut être utilisé pour des applications telles que :

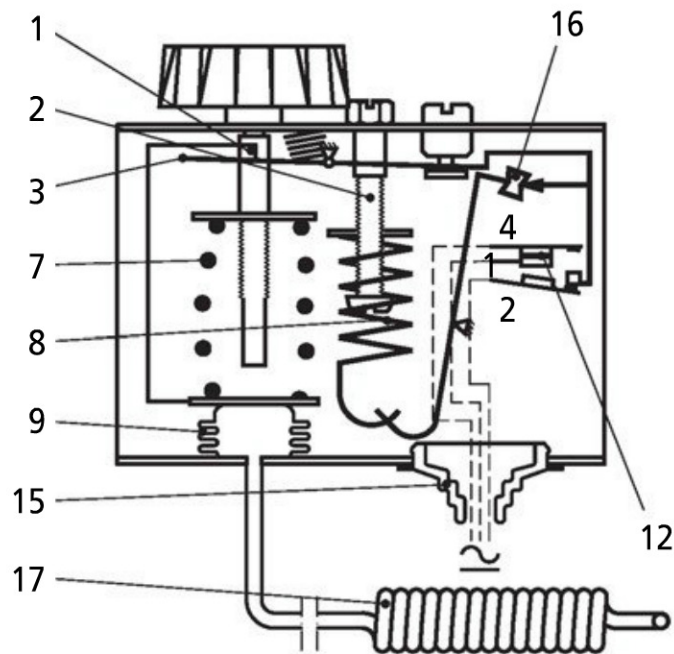
- réguler la température du médium à réfrigérer,
- contrôler la fin d'un dégivrage,
- contrôler la température de refoulement,
- réguler la température d'huile.

En fonction du schéma en figure 3.2, on peut réaliser le schéma des forces en présence (figure 3.3).

Charge du bulbe

La charge du bulbe peut être diphasique (liquide/vapeur) ou gazeuse.

On dit que la charge est « à franchissement d'ambiance » pour le cas de la charge gazeuse car le boîtier du thermostat peut être plus froid que le bulbe sans le risque que le liquide migre dans le boîtier. Si la charge liquide quitte le bulbe, ce dernier devient insensible à la grandeur à contrôler.



1. Tige de réglage de la température
2. Tige de réglage du différentiel
3. Bras principal
7. Ressort principal
8. Ressort de différentiel

9. Soufflet
12. Système de contact
15. Passage du câble
16. Rupteur
17. Bulbe/sonde

Figure 3.2 Détail d'un thermostat (Doc. DANFOSS).

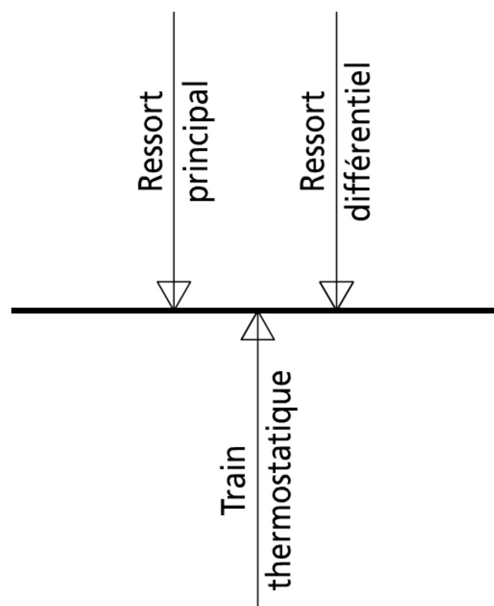


Figure 3.3 Schéma des forces d'un thermostat.

3.2 Pressostat

3.2.1 Pressostat simple

Le pressostat simple est constitué d'un raccord permettant la prise de la grandeur à réguler (figure 3.4). La plage de pression détermine l'application de l'appareil.

Le réglage du point de consigne, comme le différentiel, s'effectue par l'intermédiaire d'une molette ou vis de réglage permettant d'augmenter ou de diminuer la tension d'un ressort.

Le schéma des forces en présence est représenté en figure 3.5.

3.2.2 Pressostat plage neutre

Les pressostats plage neutre sont particuliers car ils intègrent une zone neutre (figure 3.6). Cependant, d'aspect extérieur, ils ressemblent à des pressostats standard.



Figure 3.4 Exemples de pressostats simples (Doc. DANFOSS).

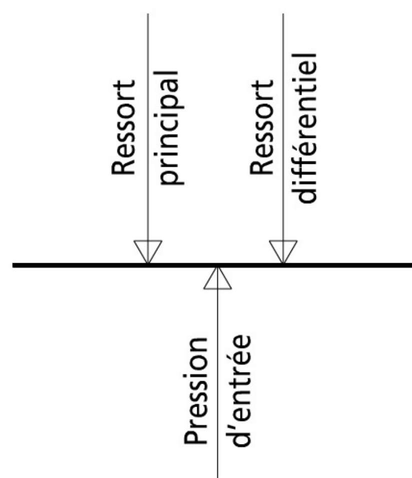
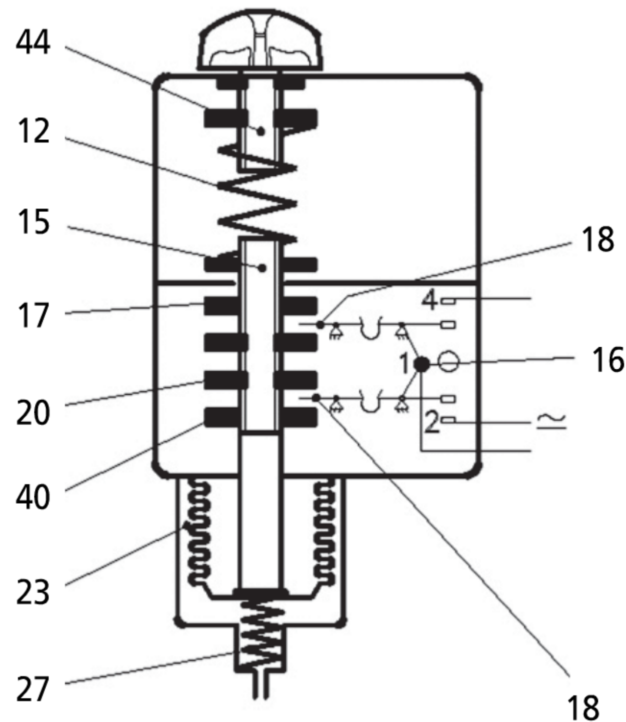


Figure 3.5 Schéma des forces d'un pressostat.



12. Ressort principal
15. Tige principale
16. Système de contact
17. Rouleau d'entraînement supérieur
18. Bras de contact
20. Rouleau d'entraînement inférieur
23. Élément de soufflet
27. Tubulure de raccordement
40. Molette de réglage de zone neutre
44. Tige de réglage de pression

Figure 3.6 Détail d'un pressostat plage neutre (Doc. DANFOSS).

3.2.3 Pressostat différentiel

Le pressostat différentiel est souvent utilisé comme élément de vérification de présence ou d'absence d'un ΔP d'une pompe à huile ou à fluide mais on peut encore les trouver pour contrôler le ΔP d'un filtre ou d'un échangeur.

Le schéma de principe (figure 3.7) indique que le réglage s'effectue par le disque de réglage venant en addition de la force de la pression du soufflet BP.

En fonction du schéma de principe, on obtient le schéma des forces (figure 3.8).

Pour ce type d'appareil, le différentiel de contact est souvent fixe. Certains pressostats différentiels peuvent intégrer une temporisation de déclenchement permettant des aléas du ΔP durant un laps de temps.

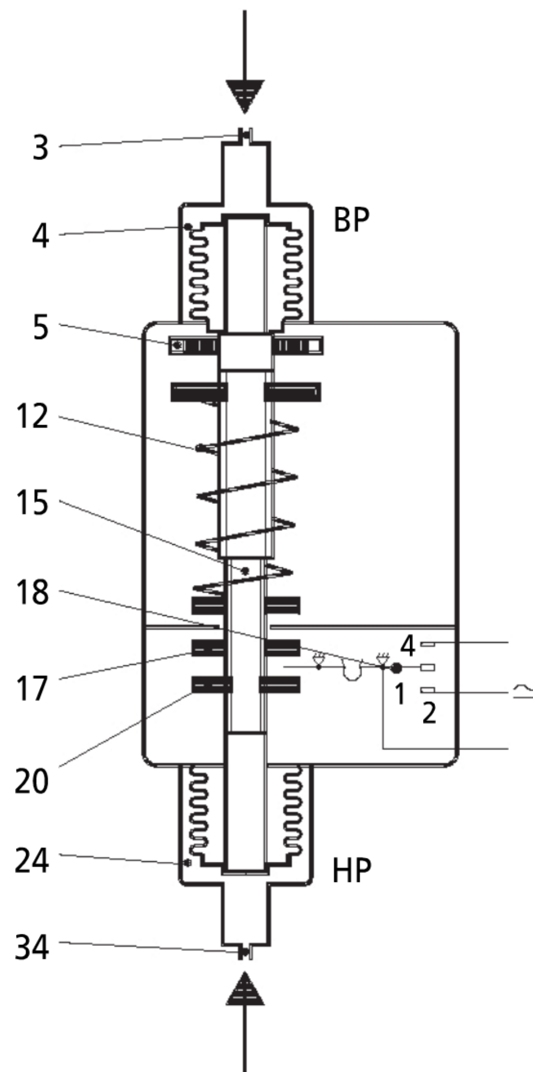
Avec ce type de matériel, la temporisation n'est pas forcément réglable et doit par conséquent être déterminée durant le choix du pressostat selon les offres des fabricants.

Dans le cas de la pression d'huile délivrée par la pompe d'un compresseur à pistons, cette dernière n'est pas constante. Celle-ci est soumise à différents phénomènes, comme la présence de fluide frigorigène dans l'huile. De plus, la pression d'huile dépend, en valeur relative, de la pression dans le carter. Ce dernier point explique la focalisation sur le ΔP de la pompe à huile et non d'une valeur absolue de pression d'huile.

La figure 3.9 indique la variation du ΔP avec, en regard, la réaction du pressostat différentiel en fonction de sa temporisation.

Remarque

Pour les appareils munis d'un bilame, il faut impérativement couper l'alimentation de l'appareil à l'arrêt du compresseur pour éviter que le pressostat ne réagisse à l'absence de pression d'huile due à l'arrêt du compresseur.



3. Raccord basse pression, BP
4. Élément de soufflet basse pression, BP
5. Disque de réglage
12. Ressort principal
15. Tige principale
17. Rouleau d'entraînement supérieur
18. Bras de contact
20. Rouleau d'entraînement inférieur
24. Élément de soufflet haute pression, HP
34. Raccord haute pression, HP

Figure 3.7 Détail d'un pressostat différentiel (Doc. DANFOSS).

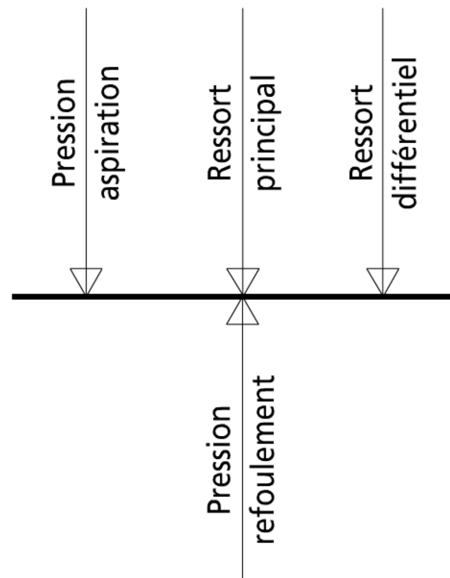


Figure 3.8 Schéma des forces d'un pressostat différentiel.

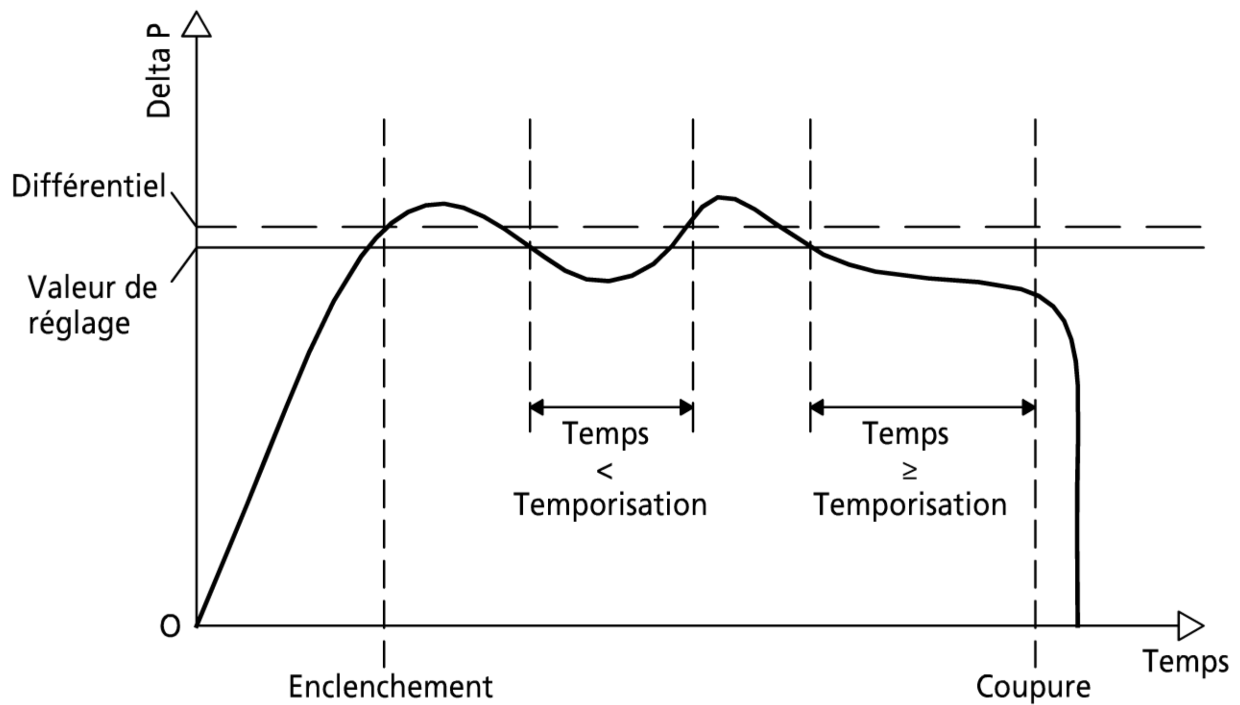


Figure 3.9 Action du pressostat différentiel en fonction de la pression dans le temps.

4 Régulation de base

Les principes donnés dans ce chapitre sont la base de la régulation frigorifique. Les réglages énoncés ici possèdent un grand nombre de variantes afin de diminuer les inerties, d'anticiper les actions…

4.1 Thermostatique

Il s'agit de la régulation la plus simple et la plus utilisée.

Le thermostat enclenche et coupe le compresseur afin de maintenir le poste frigorifique à la température désirée. La ventilation peut être mise en marche forcée ou associée au compresseur (figure 4.1).

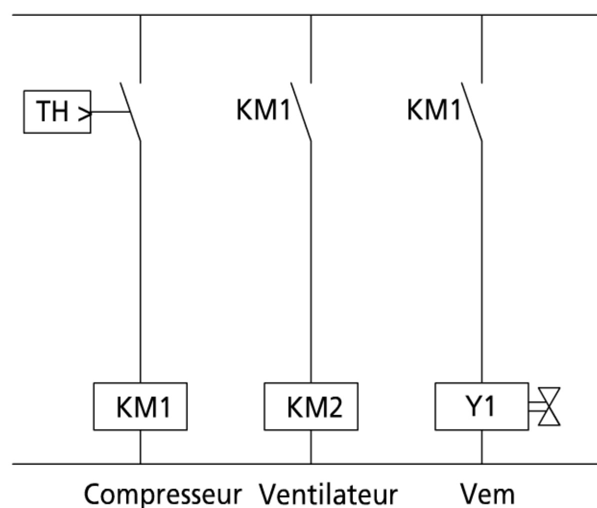


Figure 4.1 Schéma électrique de la régulation thermostatique.

4.2 Pressostatique

La régulation pressostatique s'apparente à la régulation thermostatique. Toutefois, on va utiliser la relation pression température pour régler le pressostat.

Le point de coupure correspondra à la température d'évaporation en fin de cycle et le point de ré-enclenchement sera la température de la chambre (relation pression température du fluide frigorigène) (figure 4.2).

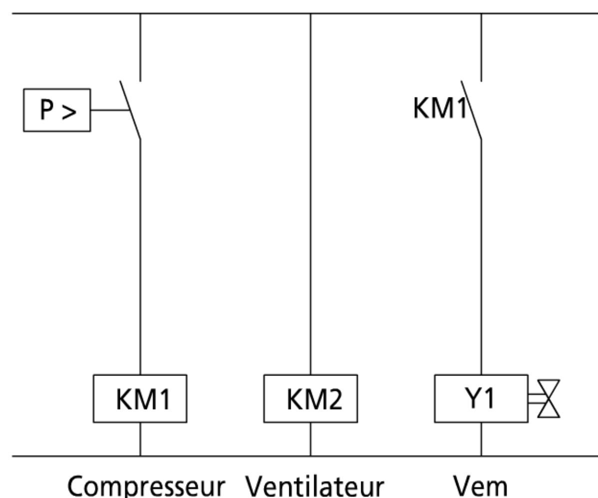


Figure 4.2 Schéma électrique de la régulation pressostatique.

4.3 Mixte

Ce type de régulation utilise un pressostat et un thermostat.

Les régulations mixtes **Mortreux** et **Inverse conjuguée** sont de moins en moins utilisées de nos jours. Ces régulations sont applicables à des postes du type « chambre froide supérieure à 0 °C ».

4.3.1 Mortreux

La régulation Mortreux est une régulation utilisée pour affiner l'hygrométrie dans les chambres froides.

Le thermostat enclenche et coupe la ventilation en fonction de la température de la chambre froide. Le pressostat enclenche le compresseur lorsque

la pression atteint la température permettant un dégivrage homogène de la batterie (relation pression/température du fluide frigorigène) (figure 4.3).

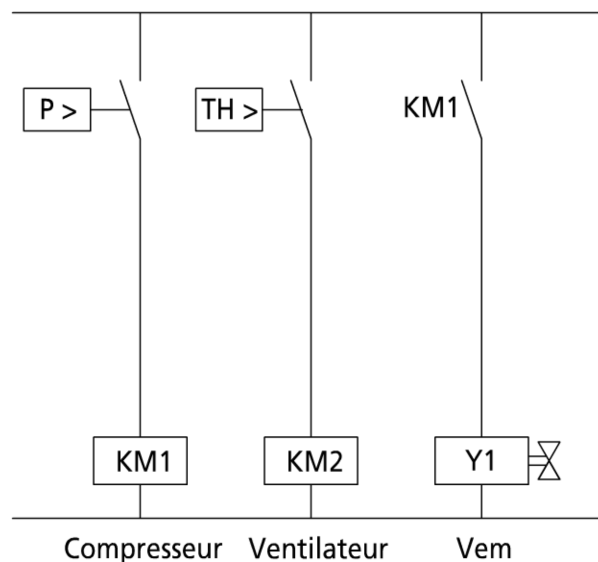


Figure 4.3 Schéma électrique de la régulation Mortreux.

La coupure du compresseur s'effectue lorsque la pression atteint la température d'évaporation en fin de cycle moins un ΔP destiné à fixer la quantité d'eau désirée.

4.3.2 Inverse conjuguée

La régulation inverse conjuguée utilise les appareils de régulation à l'inverse du système Mortreux.

Le thermostat commande le compresseur et le pressostat commande la ventilation. Ce système est utilisé pour effectuer un dégivrage en fin de cycle. Le thermostat enclenche et coupe le compresseur en fonction de la température de la chambre froide. Lorsque le thermostat coupe le compresseur, la pression remonte *via* l'échange thermique effectué par la ventilation (figure 4.4).

Le pressostat coupe la ventilation lorsque la pression atteint la température permettant un dégivrage homogène de la batterie (relation pression/température du fluide frigorigène). La remise en service de la ventilation s'effectue à la température d'évaporation correspondant au redémarrage du compresseur.

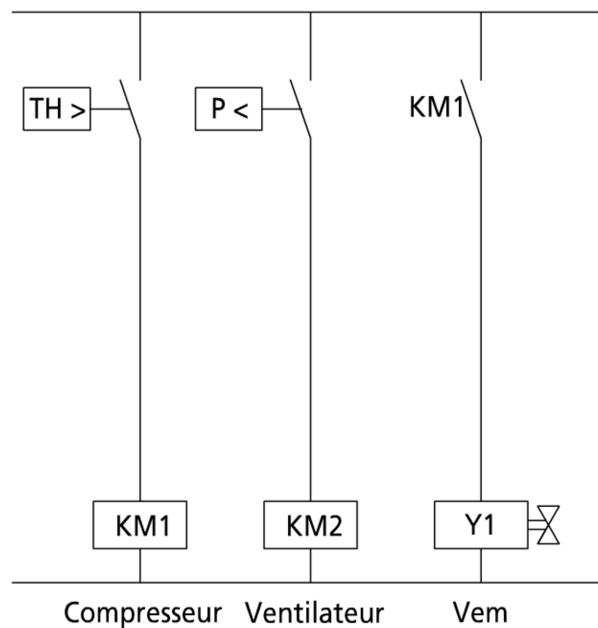


Figure 4.4 Schéma électrique de la régulation inverse conjuguée.

4.3.3 Tirage au vide (*pump-down*)

La régulation par tirage au vide (*pump-down*) est un classique de la réfrigération négative bien que l'on puisse utiliser cette régulation pour des postes positifs. L'intérêt principal de ce type de régulation est de diminuer la solubilité du fluide frigorigène dans le lubrifiant.

Le thermostat commande l'électrovanne en fonction de la température de la chambre froide. Le pressostat enclenche le compresseur à la température d'évaporation correspondant à la température haute de la chambre froide (relation pression/température du fluide frigorigène). La coupure du compresseur s'effectue, *via* le pressostat, à la valeur de température d'évaporation correspondant à la température basse de la chambre froide moins un ΔP suffisant afin de vider l'évaporateur de fluide frigorigène liquide pour éviter toute remontée de la pression.

La figure 4.5 représente le système *pump-down* automatique. Ce système présente l'inconvénient, en cas de fuite de l'électrovanne hors tension, de créer des courts cycles.

Une alternative consiste à verrouiller électriquement le compresseur à l'issue du *pump-down*. Cette dernière technique porte le nom de régulation *pump-down single* (tirage au vide simple ou unique).

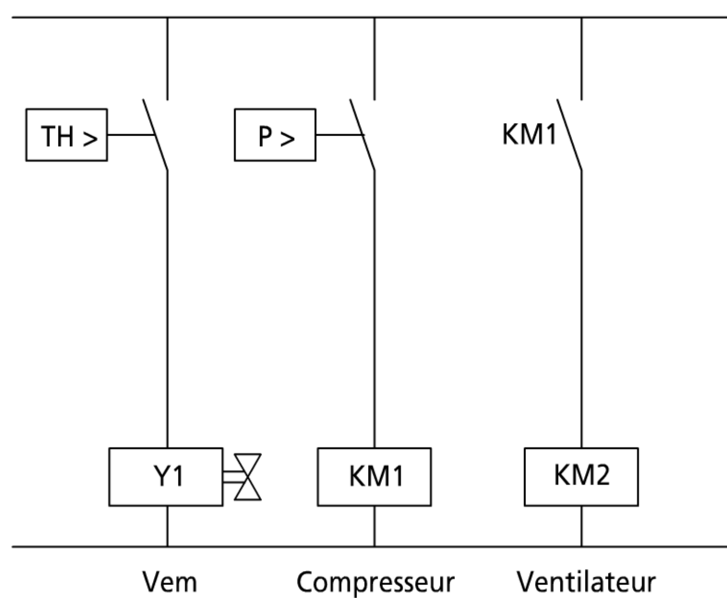


Figure 4.5 Schéma électrique de la régulation *pump-down*.

5 Cascade et plage neutre

Les centrales frigorifiques sont communément régulées par les techniques dites de cascades ou de plage neutre. Ces procédés ont pour objet de commander l'enclenchement ou la coupure d'éléments tels que des ventilateurs de condenseur à air, des compresseurs frigorifiques, etc.

Les appareils utilisés pour ces techniques de régulation sont du type :

- pressostat BP : pour la régulation cascade de compresseurs,
- pressostat HP : pour la régulation cascade de ventilateurs de condenseur,
- thermostat : pour la régulation cascade de compresseurs sur groupe frigoporteur,
- sonde de pression BP ou pressostat plage neutre BP : pour la régulation plage neutre de compresseurs,
- sonde de pression HP ou pressostat plage neutre HP : pour la régulation plage neutre de ventilateurs de condenseur,
- sonde de température : pour la régulation plage neutre de compresseurs sur groupe frigoporteur.

Dans le cas d'utilisation d'une sonde, celle-ci doit être associée à un automate de régulation ou de programmation industrielle. L'automate convertit le signal du capteur et compare la valeur convertie à la grandeur désirée afin de traduire la différence de ces deux valeurs en action de régulation.

5.1 Cascade pressostatique/thermostatique

La cascade pressostatique consiste à affecter chaque élément régulé à un point de consigne et à un différentiel indépendant, ou non, des autres éléments. Cette régulation permet le fonctionnement simultané, ou non, des éléments commandés car la réaction à la grandeur perturbatrice est indépendante du temps mais seulement liée au point de consigne.

À titre d'exemple, on remarque dans la figure 5.1 que :

- chaque compresseur possède son propre point d'enclenchement et d'arrêt. Les valeurs de réglage de chaque élément doivent être comprises entre deux limites,
- la limite basse est située par le réglage de la protection basse pression,
- la limite haute est fixée par des éléments tels que le point maximum de fonctionnement des compresseurs, les besoins frigorifiques, etc.,
- les réglages doivent assurer un fonctionnement stable et sans court-cycle des machines tout en garantissant la pression d'évaporation nécessaire au droit des postes,
- les enclenchements et coupures des compresseurs peuvent se chevaucher en fonction de la stabilité désirée et selon le process régulé.

Dans la régulation cascade, la pression agit directement sur l'organe régulé. Cette régulation présente plusieurs inconvénients. Le réglage nécessite plusieurs tâtonnements pour trouver le bon équilibre Besoins = Puissance et pour ainsi obtenir la meilleure stabilité du système.

Par ailleurs, lors des périodes de faible charge, le seul compresseur en fonctionnement aura une efficacité relativement faible de par sa basse pression plus faible que celle du régime à 100 %.

Enfin, il faut souligner que, dans le cadre d'utilisation de pressostats (et non d'automates), l'ordre d'enclenchement et de coupure des machines est figé par les réglages ce qui déséquilibre le nombre d'heures de fonctionnement des machines et oblige à modifier les réglages des pressostats en cas de panne sur un compresseur.

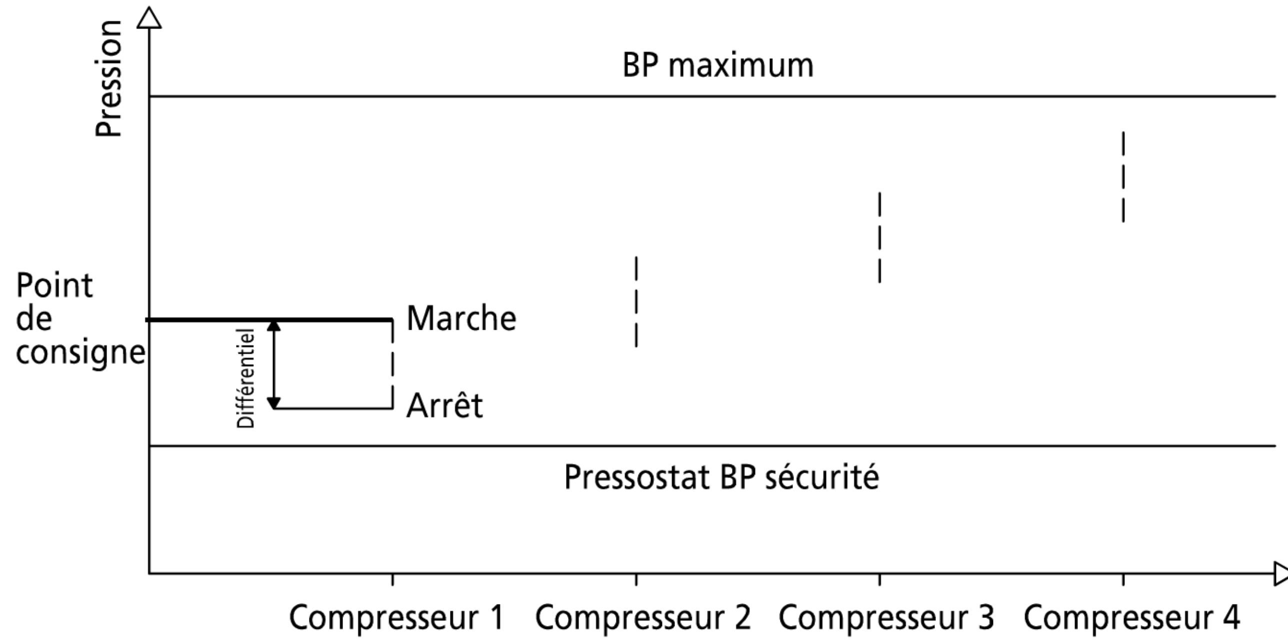


Figure 5.1 Cascade pressostatique BP.

Toutefois, ce système est traditionnellement utilisé sur les petites centrales frigorifiques ou sur les fonctionnements dégradés (panne automate) car cela reste un système de mise en œuvre facile, fiable et bon marché.

La figure 5.2 représente une cascade pressostatique HP. À l'image de la cascade pressostatique BP, on retrouve chaque étage de ventilation affecté à un point de consigne et à un différentiel.

Les valeurs de réglages sont situées entre une limite haute fixée d'une part par la sécurité HP, et d'autre part par les valeurs des soupapes de sécurité. La limite HP minimum est donnée par des contraintes de fonctionnement tels que compresseurs, détente, etc.

À l'instar de la régulation pressostatique BP, on note que la valeur résiduelle de la grandeur régulée, en l'occurrence la HP dans cet exemple, sera comprise dans une plage en liaison avec les réglages des éléments.

L'utilisation de cascade pour la régulation de refroidisseur de liquide représente un intérêt pour la stabilité du système.

En effectuant un contrôle de la température de retour du frigoporteur, on enclenche les étages de puissances répondant à l'équilibre des besoins instantanés (figure 5.3). Le calcul des valeurs de réglage s'effectue aisément, dans la mesure où le débit est constant, par le produit :

$$\dot{m} \times Cp \times dT$$

avec :

$\dot{m}$ = débit massique,

Cp = chaleur massique à pression constante,

dT = delta T entrée/sortie frigoporteur.

On remarque que la température de départ, matérialisée en trait discontinu, évolue dans une faible plage.



Figure 5.2 Cascade pressostatique HP.

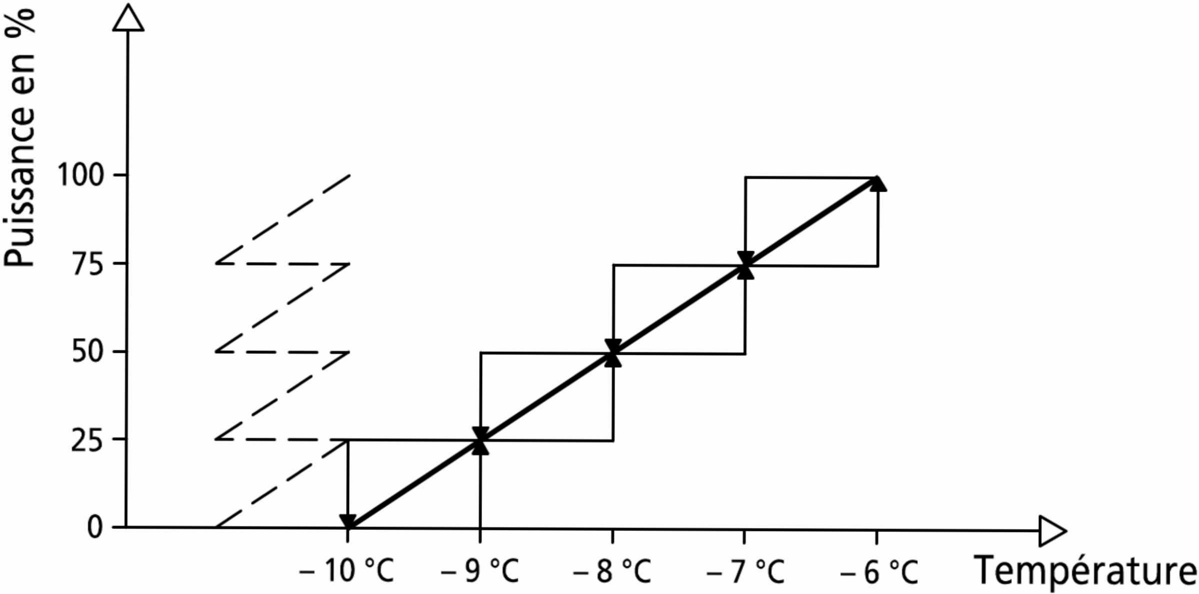


Figure 5.3 Cascade thermostatique.

Remarque

L'utilisation d'un automate avec une régulation cascade nécessite d'être vigilant vis-à-vis de la sonde mesurant la grandeur à réguler car la grandeur agit directement sur l'enclenchement de l'organe régulé.

Il y a donc lieu de veiller à l'absence de parasite sur le capteur ou à la mise en place d'un filtre *ad hoc* pour éviter toute contre-réaction fictive du système.

5.2 Plage neutre pressostatique/thermostatique

L'utilisation de régulation pressostatique « plage neutre » nécessite :

- pour la partie signal : un pressostat à plage neutre ou un capteur de pression,
- pour la partie traitement : un commutateur temporisé ou un automate.

La figure 5.4 indique une évolution de pression (courbe à forme sinusoïdale). Lorsque l'évolution de pression se situe dans la zone neutre (repère A), il n'y a aucune action de la régulation. Lors d'un franchissement de cette zone, il y a une demande de diminution (repère B) ou une demande d'augmentation (repère D).

Cette demande se traduit au bout d'une temporisation par l'enclenchement ou la coupure d'un des éléments contrôlés (un compresseur par exemple). Si la demande persiste, au bout d'une temporisation, il y aura de nouveau une action de coupure ou d'enclenchement selon la demande concernée. L'action d'arrêt de demande se produit lorsque le différentiel est franchi (repère C ou E).

Sur le pressostat à plage neutre, le différentiel n'est généralement pas réglable car il est défini par la technologie des contacts utilisés.

Cette régulation est plus facile à établir, en apparence, car il suffit d'afficher le point de consigne et de définir une zone neutre suffisamment admissible par le système pour assurer une bonne stabilité.

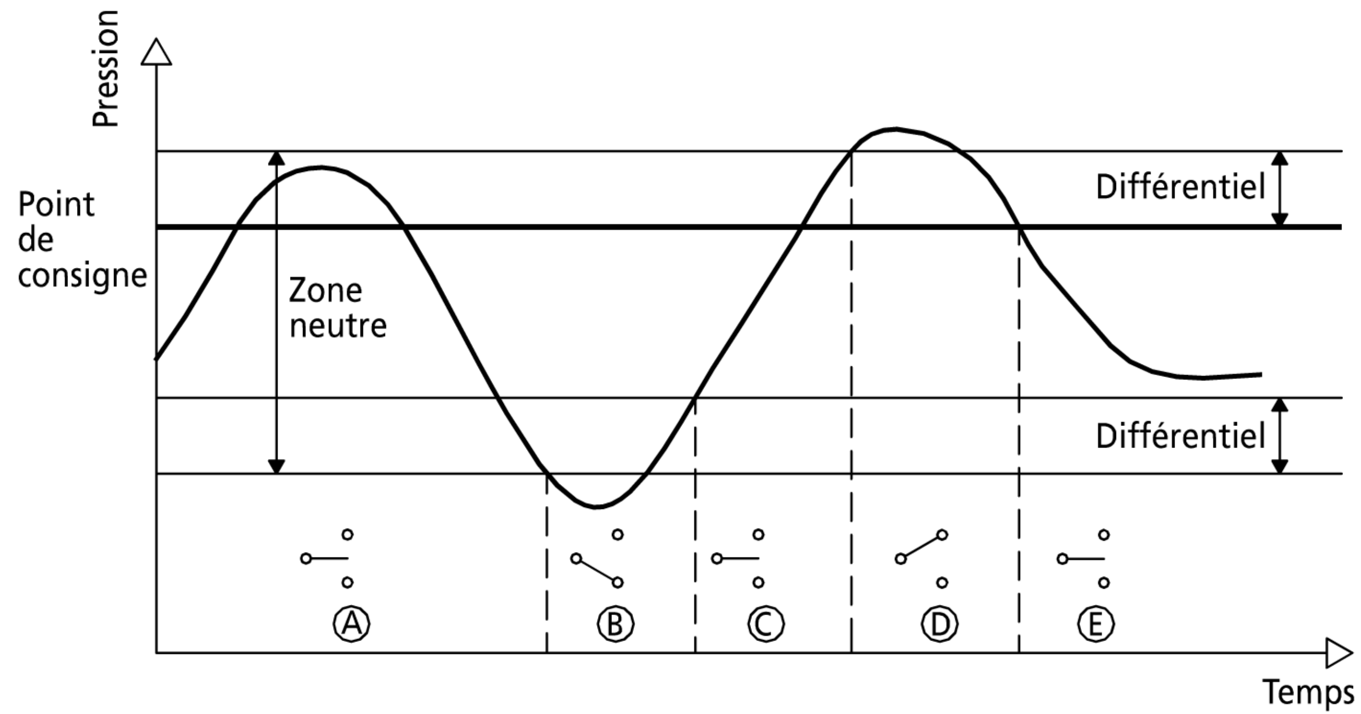


Figure 5.4 Action du pressostat plage neutre en fonction de la pression dans le temps.

Cependant, il reste à régler les temporisations à l'enclenchement et à la coupure des éléments contrôlés. Ce point est plus problématique car les valeurs de ces temporisations diffèrent entre l'enclenchement et la coupure mais elles peuvent aussi être variables en fonction de la saison.

À titre d'exemple, analysons les temporisations d'enclenchement d'une régulation en plage neutre d'un condenseur à air.

Durant l'été, la température extérieure est élevée, les charges frigorifiques sont importantes, il faut donc des temporisations relativement courtes entre les étages afin d'obtenir une contre-réaction rapide à l'action d'augmentation de HP. À l'opposé, en hiver, la température extérieure est faible et les charges frigorifiques peuvent être nettement moindres que l'été. Il faut alors dans ce cas des temporisations élevées pour éviter des contre-réactions trop rapides afin d'éviter les courts-cycles sur les étages de ventilations.

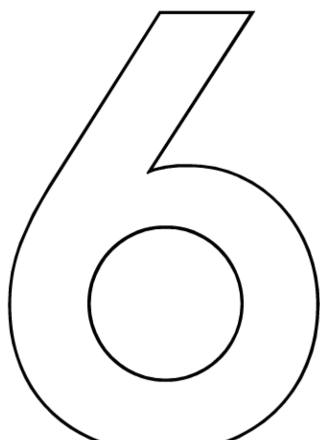
On peut décliner ces réflexions pour les temporisations au déclenchement et pour les valeurs des temporisations entre étage (par exemple, le premier étage nécessitant une valeur d'enclenchement plus courte que le deuxième étage, etc.).

Remarque

Une astuce consiste à gérer les valeurs de temporisation en fonction des conditions d'ambiance externe.

La régulation plage neutre n'est donc pas, elle aussi, exsangue d'inconvénients. Toutefois, elle reste un système largement utilisé. En outre, en régulation BP ou de température de frigoporteur, elle permet facilement des rotations d'ordre de fonctionnement des compresseurs et l'arrêt de compresseurs ne nécessite pas de modification des paramètres de régulation.

On note qu'à l'opposé de la régulation cascade, la réaction entre la demande et l'enclenchement est différé de la valeur de la temporisation définie, ce qui rend ce système plus tolérant vis-à-vis des perturbations du capteur de mesure.



Les vannes de régulation

Les vannes ont une part importante dans la régulation des systèmes frigorifiques. Elles peuvent être à commande électrique, pneumatique ou plus simplement mues par le fluide lui-même.

Il est difficile d'être exhaustif sur le sujet tant le domaine d'utilisation de ces éléments est vaste. Toutefois, nous verrons ici les utilisations les plus courantes de ces régulateurs :

- vanne Tout Ou Rien,
- vanne amont et vanne aval.

À l'issue de ce chapitre, nous aborderons les vannes pour les applications hydrauliques.

6.1 Critères de sélection d'une vanne

Le choix d'une vanne nécessite la connaissance d'éléments tels que :

- le ou les fluides en contact avec la vanne,
- la pression nominale (PN),
- la pression maximale de service (PS),
- la pression de fermeture : pression pour laquelle la vanne est encore capable de fermer,
- la pression différentielle : ΔP pour laquelle la vanne est encore capable de fermer,

- les limites de température,
- la perte de charge nominale (K_{VS}) : perte de charge de 1 bar pour x m^3/h d'eau.

De plus, il faut vérifier si la vanne nécessite une perte de charge pour ouvrir ou fermer. Ce point est d'importance, surtout si on ne dispose pas de ce ΔP (retour d'huile gravitaire par exemple).

Dans le cas d'une vanne modulante et à débit considéré, un K_{VS} fort risque d'engendrer un phénomène de pompage à charge partielle. Ce problème intervient fréquemment lorsque la production frigorifique est assurée par une centrale de plusieurs compresseurs ou avec l'utilisation de réduction de puissance. Ce point peut conduire à augmenter la perte de charge au régime nominal (figure 6.1).

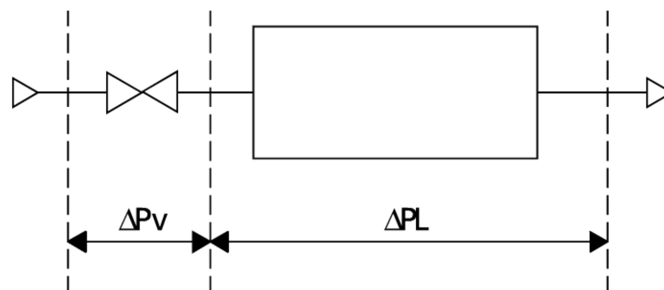


Figure 6.1 Perte de charge d'un circuit.

On voit qu'il est d'importance de dimensionner correctement la vanne avec le circuit. La grandeur informant sur cette adéquation porte le nom d'**autorité**. Le calcul de l'autorité d'une vanne est donné par la relation suivante :

$$a = \Delta P_v / (\Delta P_v + \Delta P_L)$$

avec :

ΔP_v = perte de charge de la vanne,

ΔP_L = perte de charge du circuit (sans la vanne).

On estime l'autorité d'une vanne correctement dimensionnée pour une valeur de l'ordre de 0,5.

Remarque

Les fabricants indiquent des K_{VS} et d'autres des K_V (perte de charge de n bar pour x m^3/h de fluide). Il est nécessaire de s'entendre sur le type de fluide donnant la perte de charge car certains constructeurs corrigent leurs données par la masse volumique du fluide véhiculé.

La formule ci-dessus permet de corriger le K_{VS} pour en obtenir le K_V souhaité.

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot Q^2$$

avec :

ΔP = perte de charge,

ρ = masse volumique,

a = caractéristique intrinsèque de la vanne,

Q = débit volumique.

Remarque

Hormis les vannes Tout Ou Rien, les vannes de régulation possèdent un point de consigne. Ce point de consigne va être encadré entre le moment où la vanne commence à s'ouvrir et celui où la vanne est ouverte à 100 %. Il est donc utopique de vouloir maintenir une pression fixe. La valeur de cet encadrement dépendra de la forme du clapet, de sa sélection, de son réglage et de sa perte de charge.

6.2 Les vannes Tout Ou Rien

Il s'agit de vannes dont le débit est total ou nul, la commande étant généralement extérieure. Elles sont principalement électriques et se retrouvent souvent dans la littérature technique sous les noms de vannes électromagnétiques, vannes solénoïdes ou encore électrovannes. Ces vannes peuvent être à deux voies (une entrée et une sortie) ou à plusieurs voies (plusieurs entrées et plusieurs sorties).

Les fonctionnalités de ces vannes sont les suivantes :

- assurer le passage ou non du fluide dans le cas par exemple d'une régulation de la demande frigorifique dans une chambre froide,
- orienter le fluide dans telle ou telle direction selon un but précis de fonctionnement,
- assurer la régulation souhaitée d'une pression.

La commande de ces vannes est soit directe, soit à pilote.

Dans le cas de l'action directe, l'excitation électrique d'un noyau libère ou ferme le passage de fluide. Dans le cas d'une vanne à pilote, le noyau excité ne va pas agir directement sur le fluide mais va ouvrir ou fermer un orifice interne ce qui provoquera, par le jeu de pression, un mouvement d'ouverture ou de fermeture sur le corps principal.

Il y a lieu de garder cette différence en mémoire car l'utilisation d'une vanne pilote requiert une action sur le corps principal ce qui conditionne la plage d'utilisation de la vanne.

Remarque

Certaines vannes permettent une ouverture lente de la vanne ce qui peut être utile dans des applications afin d'éviter les coups de bélier (ex. : gaz chauds). Cette ouverture lente est obtenue par le jeu de contre-pression et de dégazage d'orifice interne de faible section.

6.3 Vanne amont et vanne aval

6.3.1 Forces en présence

Ces vannes sont constituées d'un clapet s'ouvrant ou se fermant dans le sens du fluide. Elles possèdent un ressort de réglage qui va contrebalancer la pression du fluide. Dans le cas de la vanne amont, lorsque la force du ressort sera dominante, la vanne se fermera, alors que dans le cas de la vanne aval, celle-ci s'ouvrira.

La figure 6.2 donne une représentation graphique de ces vannes avec les forces en présence. Les forces antagonistes exercées dans la vanne s'annulent par égalité des surfaces.

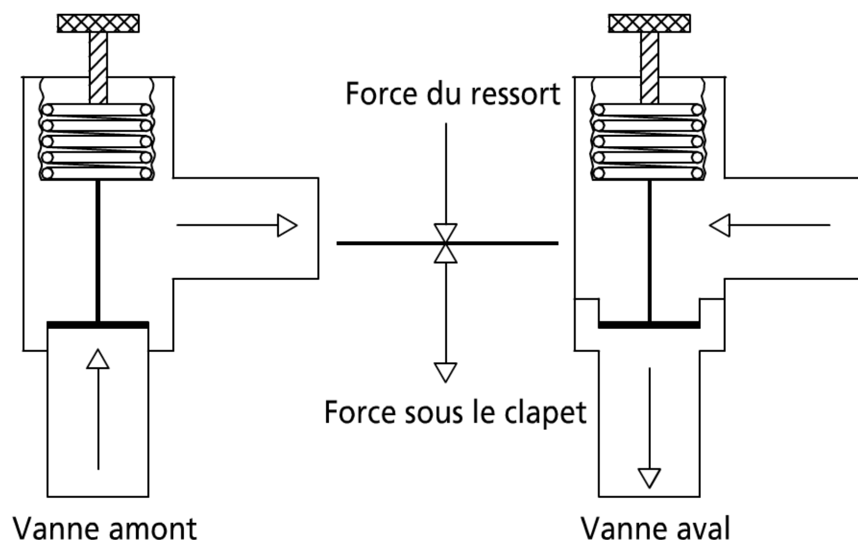


Figure 6.2 Schéma de principe des vannes aval et amont.

Remarque

Il est impératif d'avoir le schéma de ces vannes en tête durant leur réglage afin de connaître le sens de l'action lorsque l'on agit sur le ressort.

6.3.2 Vanne amont

Les vannes amont sont utilisées pour les applications principales suivantes :

- contrôle de la pression d'évaporation,
- contrôle de la pression de condensation,
- contrôle de la pression de refoulement.

Contrôle de la pression d'évaporation

La vanne est localisée à la sortie de l'évaporateur (figure 6.3). Selon la valeur de la pression d'évaporation souhaitée, la vanne se ferme ou s'ouvre pour laisser échapper le fluide frigorigène de l'évaporateur.

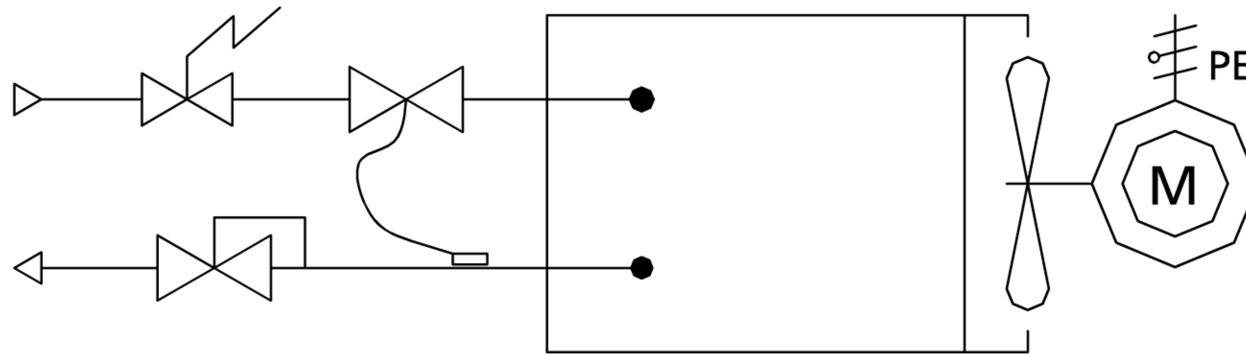


Figure 6.3 Montage en régulation de pression d'évaporation.

En fait, la vanne est au départ fermée par la pression du ressort. En s'évaporant, le fluide augmente la pression dans l'évaporateur et la force de poussée sur le clapet. Lorsque cette force devient dominante, la vanne s'ouvre. La pression rechute sous l'action du fluide s'échappant de l'évaporateur vers l'aspiration et la vanne se referme.

On utilise cette vanne lorsque l'on souhaite maîtriser le ΔT d'échange thermique pour des problèmes de prise en glace ou de contrôle d'hygrométrie.

Remarque

La réduction du ΔT d'échange agit proportionnellement sur la puissance échangée.

Contrôle de la pression de condensation

L'objectif de ce contrôle est d'assurer un ΔP suffisant à (aux) organe(s) de détente. La tolérance de variation de HP entre les différents systèmes de détente variera beaucoup selon ceux-ci.

Un détenteur thermostatique est relativement sensible à la variation de ΔP alors qu'un purgeur HP peut maintenir ses performances avec seulement 20 % de son ΔP nominal (voir chapitre 7, « Les détendeurs »).

Pour le contrôle de la pression de condensation, la vanne amont peut être soit installée au refoulement (figure 6.4), soit installée sur la sortie du ou des condenseurs (figure 6.5).

Dans le premier cas, le contrôle de la pression de condensation est réalisé indirectement du fait qu'on ne contrôle pas directement la grandeur que l'on souhaite. Toutefois, ce système fonctionne dans la mesure où l'on y associe une vanne de contrôle de la pression réserve liquide (voir « Contrôle de la pression dans la réserve liquide » au paragraphe 6.3.3). On dispose alors, dès le démarrage de la machine, d'une pression suffisamment élevée pour pressuriser le liquide HP.

Dans le deuxième cas, on agit directement sur la grandeur désirée, cependant il faut également une vanne de contrôle de la pression réserve liquide. La vanne de contrôle de pression de condensation étant fermée à l'arrêt de la machine, il faut donc obligatoirement pressuriser le liquide HP au démarrage des compresseurs afin d'éviter tout flash gaz.

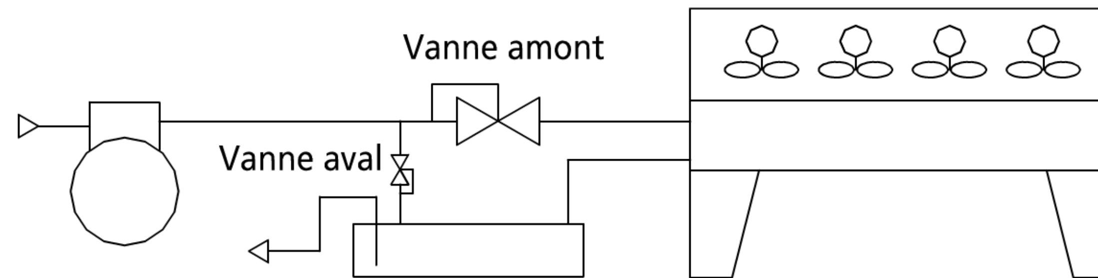


Figure 6.4 Montage en régulation de pression de condensation.

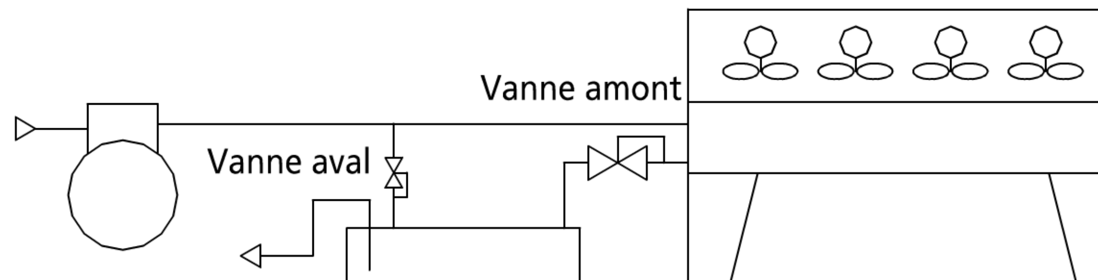


Figure 6.5 Montage en régulation de pression de condensation (Variante).

Le mécanisme d'augmentation de HP est basé sur la diminution de surface d'échange provoquant une augmentation artificielle du ΔP. En effet, lorsque la vanne amont est fermée au démarrage, le fluide frigorigène liquide se stocke dans le condenseur engorgeant ainsi celui-ci. La HP augmente en fonction de la réduction de la surface d'échange utile pour la condensation jusqu'à l'ouverture de la vanne. La vanne modulera ensuite pour maintenir la consigne de HP donnée.

L'utilisation de cette vanne conduit à augmenter les charges en fluide frigorigène durant l'hiver. En été, ces charges se transforment facilement en excès de charge.

On voit l'importance de la bouteille réserve liquide qui devra stocker cette forte variation de charge. Si cette bouteille n'est pas adaptée, on risque d'être en excès de charge dans l'installation durant les périodes d'été.

Remarque

Une attention particulière doit être portée sur le positionnement des organes HP pour la régulation des étages HP dans le cas du montage de la vanne au refoulement. Si ces organes sont montés en amont de la vanne, on risque d'enclencher des étages alors que la HP est déjà trop faible et donc ne jamais parvenir à faire croître celle-ci.

Contrôle de la pression de refoulement

À l'instar du premier montage ci-avant pour le contrôle de la pression de condensation, la vanne se monte sur le refoulement du ou des compresseurs.

L'objectif de ce montage est de garantir très rapidement, au démarrage du système frigorifique, une pression de refoulement minimum. Une application courante se trouve dans l'utilisation de compresseur à vis à lubrification par fluide moteur HP. Ces compresseurs ne disposent pas de pompe à huile et c'est la HP qui pousse l'huile du séparateur au compresseur. On voit l'importance de garantir une HP minimum.

On retrouve également ce type de vanne dans le cas de dégivrage par gaz chauds (voir chapitre 9, « Le dégivrage »).

6.3.3 Vanne aval

Les vannes aval sont utilisées pour les applications principales suivantes :

- contrôle de la pression d'aspiration,
- contrôle de la capacité,
- contrôle de la pression réserve liquide.

Contrôle de la pression d'aspiration

La vanne d'aspiration est couramment employée avec les compresseurs à pistons, sans réduction de puissance, dans les applications basse température lorsque les conditions de démarrage diffèrent fortement des conditions nominales de conception du système (par exemple un tunnel de surgélation : démarrage du système à + 20 °C ; condition nominale à −45 °C).

Lors du démarrage, la masse volumique du fluide frigorigène est très élevée, ce qui impose une puissance de moteur électrique également très élevée. Cependant, les conditions nominales imposent un moteur de faible puissance et adapté afin de garantir un rendement du moteur optimal. La vanne d'aspiration montée au plus près de l'aspiration du ou des compresseurs se ferme dès que la pression en aval de la vanne devient dominante vis-à-vis du réglage du ressort de celle-ci. En marche normale, la vanne restera ouverte en permanence (figure 6.6).

Une autre solution à la vanne de démarrage consiste à utiliser un détendeur MOP (voir chapitre 7, « Les détendeurs »). Cependant le détendeur MOP présente l'inconvénient majeur de ne pas être ajustable au système et de ne pas être monté au plus près du ou des compresseurs.

Remarque

Le réglage de la vanne s'effectue de manière optimale en contrôlant au démarrage que l'intensité absorbée par le(s) compresseur(s) est au maximum égale à l'intensité plaquée du moteur.

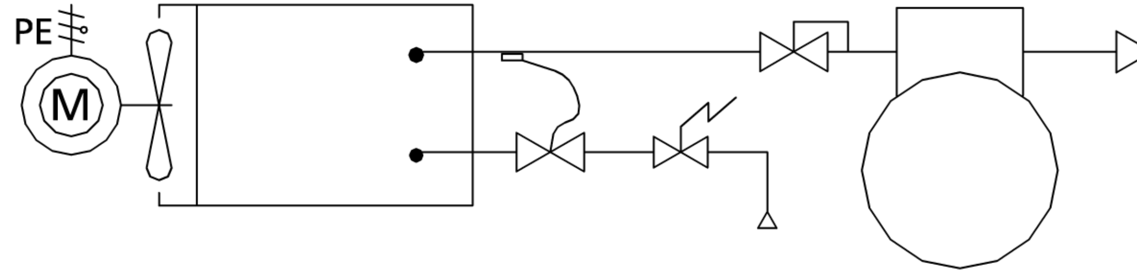


Figure 6.6 Montage en vanne de démarrage.

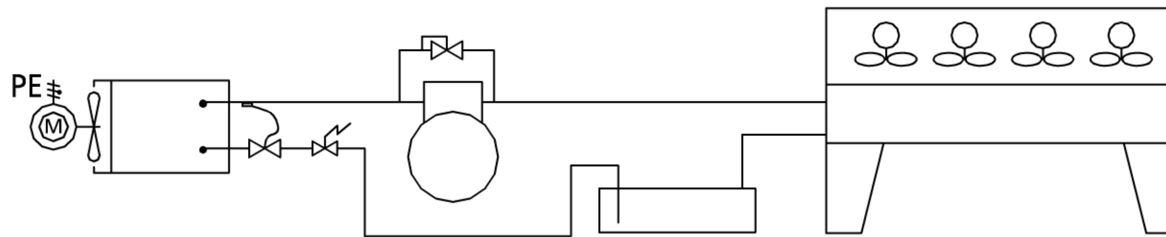


Figure 6.7 Montage en régulation de capacité.

Contrôle de la capacité

La vanne aval, en application de contrôle de capacité, se monte entre la HP et la BP (figure 6.7). L'objectif est d'injecter des vapeurs HP lorsque la BP est trop basse. Ce système permet :

- d'éviter des BP trop faibles avec les risques de prises en glace pour les refroidisseurs d'eau,
- de servir de régulation de puissance frigorifique.

Il s'agit d'un système simple et peu coûteux. Cependant, dans le cas de la régulation de puissance, c'est une technique énergivore. En effet, le(s) compresseur(s) absorb(ent) 100 % de puissance même lorsque la demande frigorifique est très réduite.

Remarque

L'injection de HP à l'aspiration du compresseur augmente la surchauffe à l'aspiration et donc, par conséquent, la température de refoulement. Une solution simple pour éviter cette surchauffe consiste à injecter les vapeurs HP entre le détendeur et l'évaporateur. Certains constructeurs proposent des accessoires pour faciliter le raccordement.

Contrôle de la pression dans la réserve liquide

Le contrôle de la pression dans la réserve liquide a pour objectif d'injecter des vapeurs HP dans le réservoir HP afin d'éviter les phénomènes de flash gaz (vaporisation instantanée dans un liquide). Il s'agit d'une vanne complémentaire que l'on associe à une vanne de contrôle de la pression de condensation. Cette vanne peut être substituée par une vanne différentielle ou plus simplement un simple clapet taré.

Remarque

Le réglage de cette vanne doit être réalisé avec attention car un point de consigne trop élevé ouvrira la vanne en permanence créant ainsi un by-pass du condenseur alors qu'un point de consigne trop faible rendra la vanne inutile.

6.4 Vanne hydraulique

Il existe plusieurs types de vannes hydrauliques :

- **vannes à siège** : ces vannes sont bien adaptées aux réglages car le mouvement progressif du siège permet une diminution progressive du débit,
- **vannes à secteur** : elles sont utilisées pour le mélange car leur perte de pression est faible,
- **vannes papillon** : on utilise ces vannes pour la fermeture ou l'ouverture. Ces vannes ne sont pas adaptées au réglage.

6.4.1 Montage en décharge

Le principe du montage en décharge est d'assurer un débit variable à la batterie sous une température constante (figure 6.8).

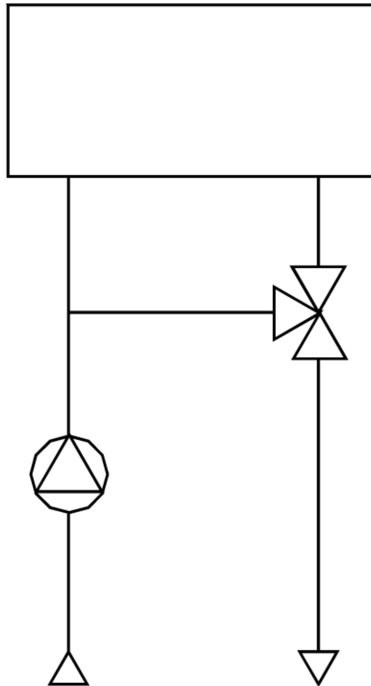


Figure 6.8 Montage en décharge.

6.4.2 Montage en mélange

Avec le montage en mélange (figure 6.9), on maintient un débit constant dans la batterie sous une température variable.

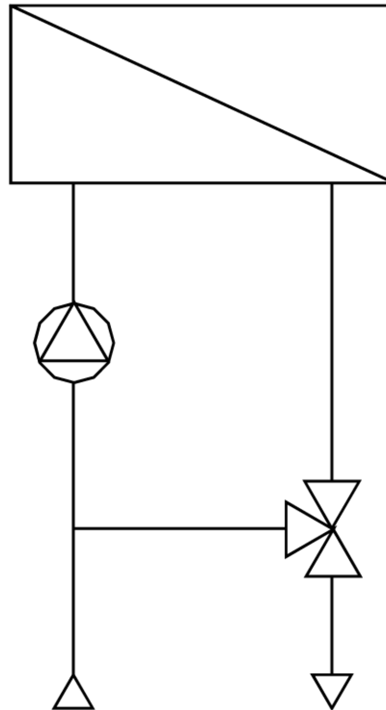
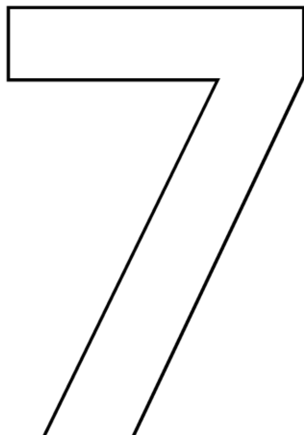


Figure 6.9 Montage en mélange.

Remarque

Lors de la sélection d'une vanne, il faut vérifier impérativement que la vanne est prévue pour le montage souhaité. Certaines vannes acceptent les deux modes de montage, d'autres vannes sont sélectives. La raison de cette sélectivité est due aux forces exercées au droit du clapet ce qui rend, en cas d'incompatibilité, la fermeture voire la manœuvre impossible de la vanne.



Les détendeurs

Le détendeur est l'un des quatre organes fondamentaux du circuit frigorifique à compression de vapeur. Son rôle est avant tout de détendre le fluide frigorigène de la HP vers la BP en assurant le débit pour le remplissage correct de l'évaporateur.

7.1 Détendeur capillaire

Ce type de détendeur est réservé aux applications de petite puissance. Le nom « capillaire » vient de l'appellation du tube dont il est fait et n'a aucun lien avec le phénomène de capillarité (figure 7.1). Concrètement, le détendeur capillaire est un tube de petite section plus ou moins long. Il présente l'avantage d'être bon marché mais a l'inconvénient de n'alimenter correctement l'évaporateur qu'en fin de cycle. À l'arrêt du compresseur, la haute et basse pression s'équilibrent ce qui permet à un moteur de faible couple de démarrer sans difficulté.

La perte de charge générée par un capillaire dépend :

- du diamètre interne du tube,
- de sa longueur,
- de la rugosité interne du tube,
- du fluide frigorigène utilisé.

La méconnaissance des critères intrinsèques au tube conduit souvent à déterminer le capillaire de façon expérimentale.

Remarque

À l'arrêt du compresseur, la HP et la BP sont mis en communication par ce capillaire. Aussi, la réserve liquide est proscrite dans ce type d'application.

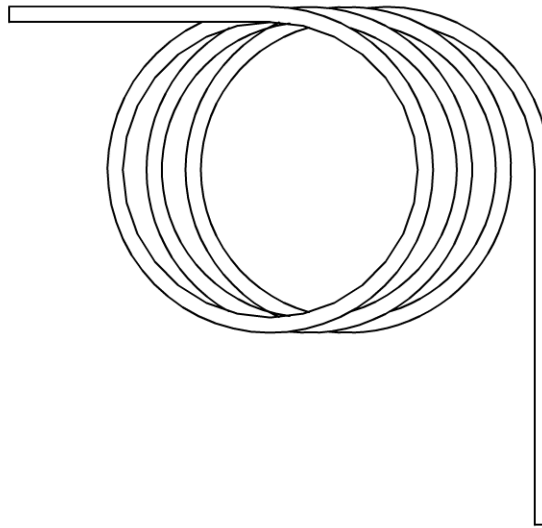


Figure 7.1 Tube capillaire.

7.2 Détendeur thermostatique interne et externe

7.2.1 Détendeur à égalisation interne

Il s'agit du détendeur le plus utilisé dans les applications commerciales. Il est constitué d'une vanne sur laquelle se trouve un train thermostatique composé d'un soufflet, d'un capillaire et d'un bulbe (figure 7.2).

Le train thermostatique contient un fluide appelé « la charge » et est l'élément pilote du détendeur.

Le fonctionnement d'un détendeur est le résultat de trois forces :

- force de la pression d'évaporation (force de fermeture),
- force du ressort de réglage (force de fermeture),
- force du train thermostatique (force d'ouverture).

Le bulbe du détendeur est positionné à la sortie de l'évaporateur.

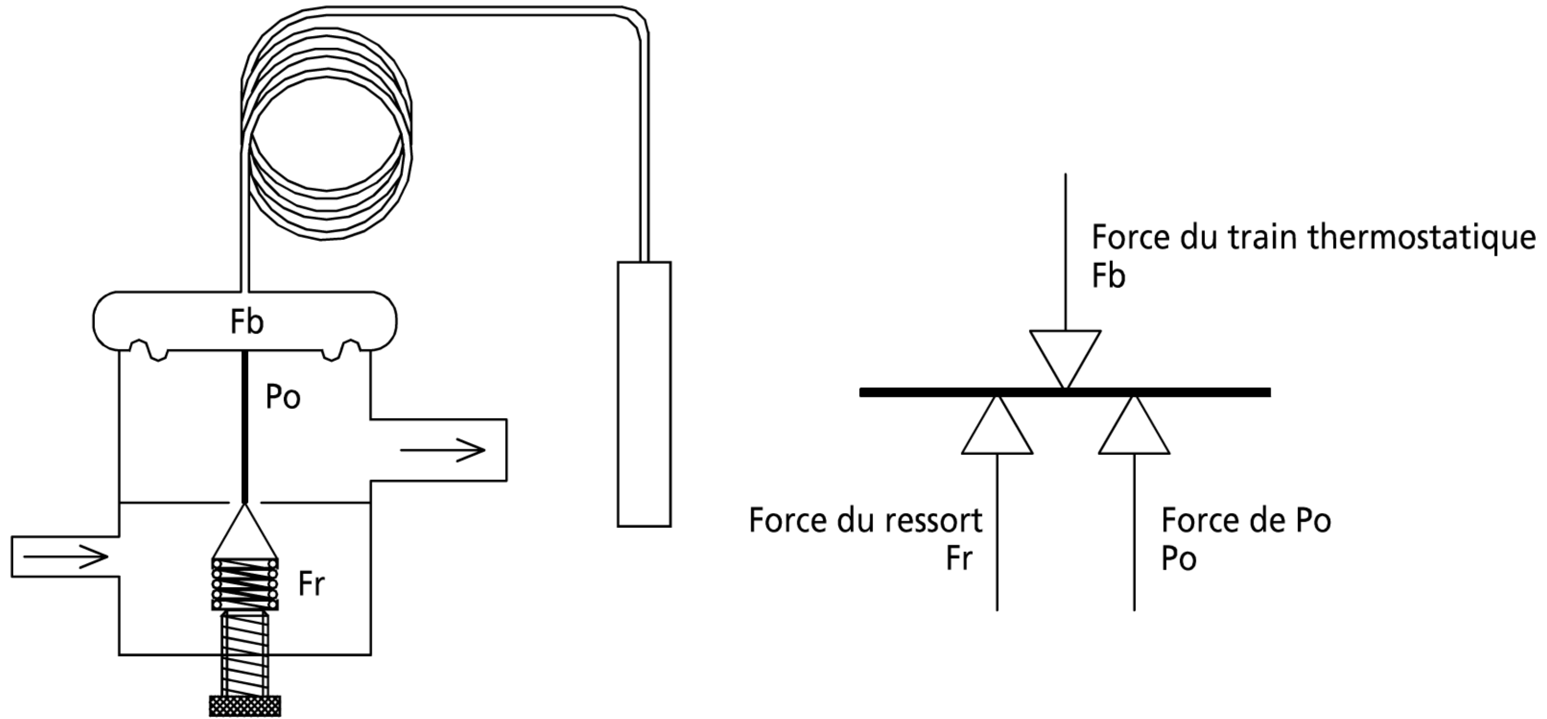


Figure 7.2 Schéma de principe du détendeur thermostatique à égalisation interne.

Lorsque le fluide frigorigène liquide se rapproche de la sortie de l'évaporateur, la température du bulbe tend vers la température de ce liquide (soit la température d'évaporation). Les forces d'évaporation et du train thermostatique seront alors très proches en valeur et la force du ressort de réglage devient prépondérante. Cette force étant une force de fermeture, le détendeur se ferme.

Le détendeur étant fermé, le liquide s'évapore et le bulbe du détendeur se réchauffe. Lorsque le bulbe est suffisamment chaud pour que sa force devienne prédominante vis-à-vis de la force d'évaporation plus celle du ressort, le détendeur s'ouvre.

Lorsque le détendeur réagit comme décrit précédemment, on dit qu'il pompe, c'est-à-dire qu'il est soit mal réglé, soit trop puissant pour l'évaporateur.

En fait, un fonctionnement intermédiaire se produira quand le détendeur agira sur son pointeau proportionnellement pour maintenir les forces en équilibre.

L'écart de température entre la pression d'évaporation (relation pression/température) et la température du bulbe porte le nom de « surchauffe ».

Il y a lieu d'effectuer quelques remarques :

- Le détendeur est un organe proportionnel ou le ressort fait office de bande proportionnelle. Une tension de ressort trop faible provoquera un pompage à l'instar d'une bande proportionnelle trop faible.
- Le détendeur est une vanne et son K_v (on parle de puissance) doit être adapté au système.
- Comme décrit précédemment, il s'agit d'un mécanisme faisant intervenir plusieurs éléments qui possèdent de manière intrinsèque des constantes de temps élevées. Le détendeur thermostatique réagit dans des temps de 2 à 10 minutes et plus dans certains cas.
- La nature de la charge du train thermostatique influencera grandement le fonctionnement du détendeur et devra dans tous les cas être adaptée au fluide frigorigène de l'installation.
- Le couple détendeur-évaporateur doit posséder une constante de temps proche pour obtenir une surchauffe faible.

Remarque

Un détendeur thermostatique maintient couramment une surchauffe de 6 à 7 K sur des évaporateurs à ailettes à air ventilé du type cuivre-aluminium.

7.2.2 Détendeur à égalisation externe

Dans le fonctionnement du détendeur thermostatique interne, on compare la force du train thermostatique avec celle de la pression d'évaporation à l'entrée de l'évaporateur. Or, dans les évaporateurs de fortes puissances, la perte de charge interne de l'évaporateur peut être de plusieurs degrés.

Cette perte de charge va venir s'additionner à la surchauffe désirée du fait que le liquide plus froid à proximité de la sortie de l'évaporateur aura tendance à faire fermer le détendeur (*via* le train thermostatique).

Dans le détendeur thermostatique à égalisation externe (figure 7.3), on remplace la force de la pression d'évaporation à l'entrée de l'évaporateur par celle se trouvant à la sortie. On obtient ainsi la surchauffe que l'on souhaite régler.

Remarque

Un évaporateur ayant un distributeur de liquide (perte de charge élevée) conduira à l'utilisation d'un détendeur thermostatique externe.

7.2.3 Charge du train thermostatique

On distingue deux grandes catégories de charge :

- la charge liquide,
- la charge gazeuse.

La charge liquide est constituée d'un fluide dont les phases liquide et gazeuse sont présentes durant le fonctionnement nominal. Ce fluide possède des caractéristiques proches du fluide en présence dans l'installation sans toutefois être forcément de même nature. Certains fabricants agissent sur la charge pour obtenir un temps de réponse plus rapide.

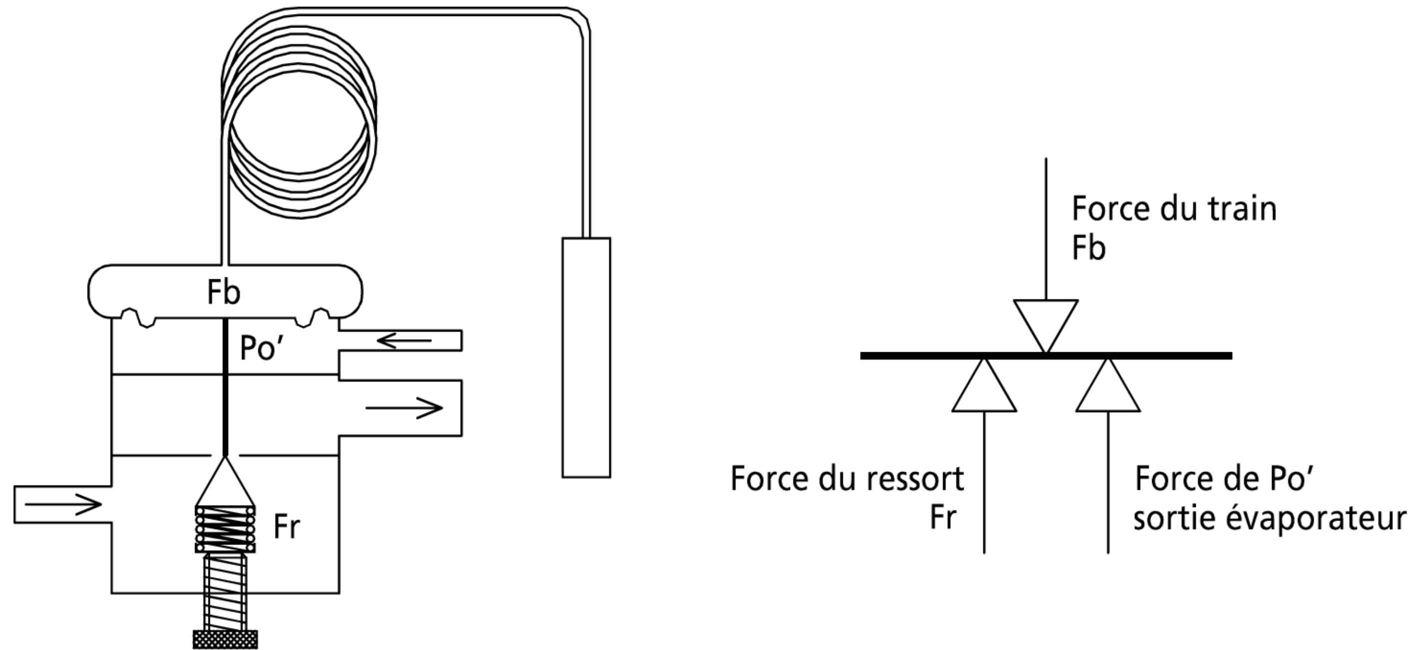


Figure 7.3 Schéma de principe du détendeur thermostatique à égalisation externe.

La charge gazeuse est constituée d'un gaz et d'une matière adsorptive. C'est la matière qui adsorbera plus ou moins le gaz en fonction de sa température.

Remarque

La charge liquide est sensible aux migrations (voir chapitre 3, « Les organes mécaniques de régulation ».

7.2.4 Détendeur MOP (*Maximum Operating Pressure*)

Le détendeur MOP, à l'instar de la vanne de démarrage, est utilisé pour limiter l'intensité absorbée au démarrage de la machine frigorifique (démarrage à température ambiante jusqu'à la température nominale de réfrigération).

Le détendeur MOP est constitué d'une charge liquide dont on limite la quantité de liquide afin d'avoir exclusivement de la vapeur à une température dite « point MOP » (figure 7.4).

Lors du démarrage de la machine, le bulbe ne possède que de la vapeur en évolution isochore à la température de démarrage. C'est-à-dire que la force d'ouverture est faible et que la moindre quantité de fluide injectée dans l'évaporateur engendre une pression suffisante pour faire fermer le détendeur. La quantité de fluide limitée dans l'évaporateur évite la remontée d'évaporation et ce jusqu'à atteindre la valeur du point MOP où le train thermostatique voit apparaître une goutte de liquide.

En fait, entre le démarrage jusqu'au point MOP, le liquide frigorigène progressera lentement, *via* les ouvertures du détendeur, jusqu'à obtenir la surchauffe nominale.

En deçà du point MOP, le détendeur se comportera comme un détendeur classique à charge liquide.

Remarque

Dans les applications centralisées, l'usage d'un détendeur MOP est proscrit afin de bénéficier de la puissance maximale du détendeur au démarrage et en sortie de dégivrage.

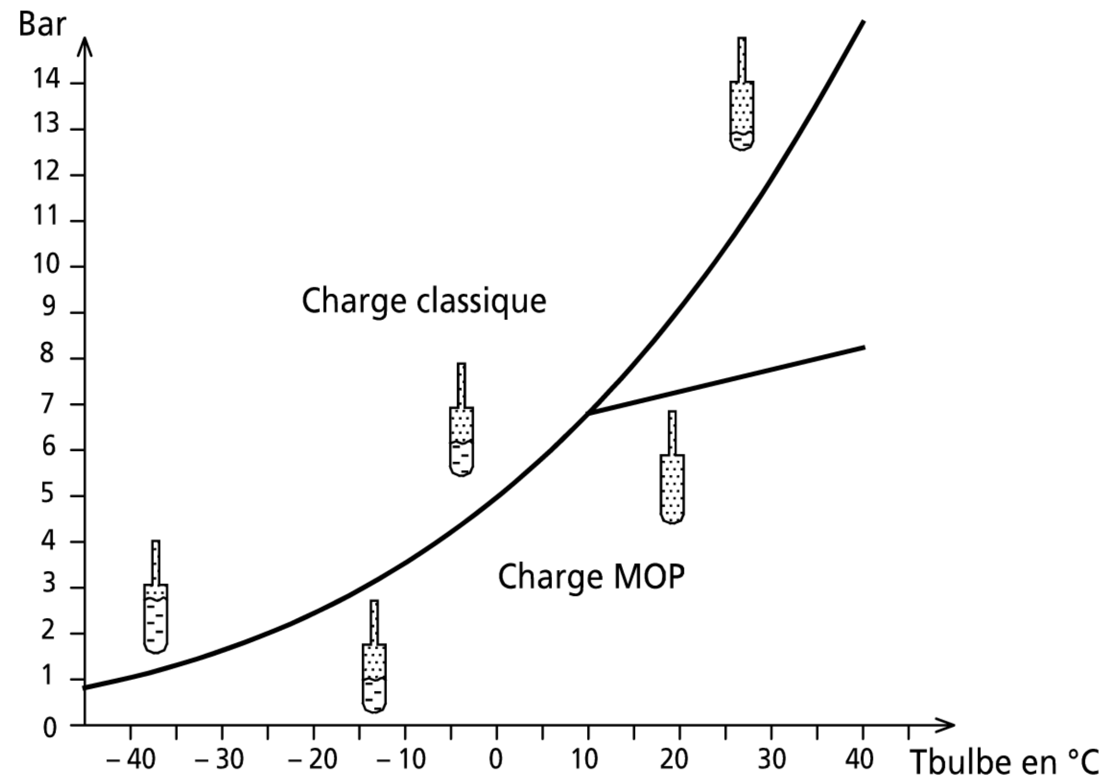


Figure 7.4 Graphe de l'évolution de pression en fonction de la température selon la charge.

7.2.5 Détendeur multi-orifices

Une des difficultés générées avec les détendeurs traditionnels réside dans l'adaptation de la puissance du détendeur aux besoins. Les besoins frigorifiques d'un évaporateur varient selon :

- le démarrage,
- le dégivrage,
- l'introduction de charge frigorifique (denrées, produits, etc.),
- le début à la fin d'un cycle.

Le détendeur multi-orifices répond à ces préoccupations grâce à l'adaptabilité de son K_v. Ce détendeur multi-orifices possède, comme sa désignation l'indique, plusieurs orifices (deux ou trois) qui vont s'ouvrir en fonction des besoins.

Version deux orifices

Voir figure 7.5.

Version trois orifices (avec *bleed port*)

Voir figure 7.6.

En fonction de la température du bulbe, un ou deux orifices seront dégagés permettant ainsi une adéquation plus aisée de la puissance frigorifique à la demande. Grâce à ce système, la capacité du détendeur peut être doublée.

L'orifice, appelé « *bleed port* », est un orifice de fuite permanent visant une réaction plus rapide du détendeur lors d'une variation brusque de la surchauffe. Cet orifice n'offre pas plus d'avantage significatif en application en deçà de –18 °C et la fuite permanente peut être un risque de coup de liquide si ce dernier est trop important.

Le choix de l'utilisation d'un détendeur à trois orifices devra être fait après mûre réflexion.

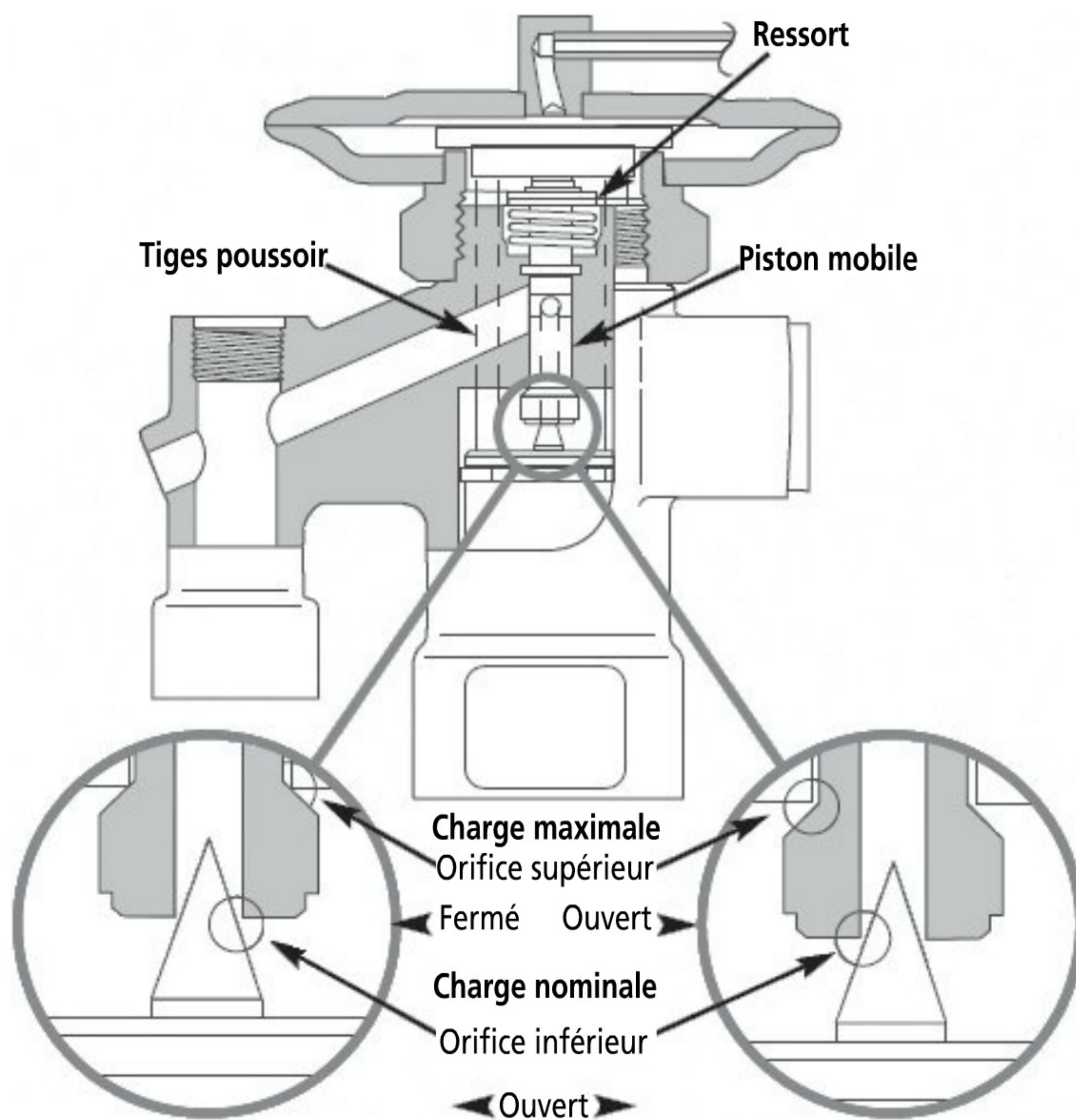


Figure 7.5 Détendeur à deux orifices (Doc. SPORLAN).

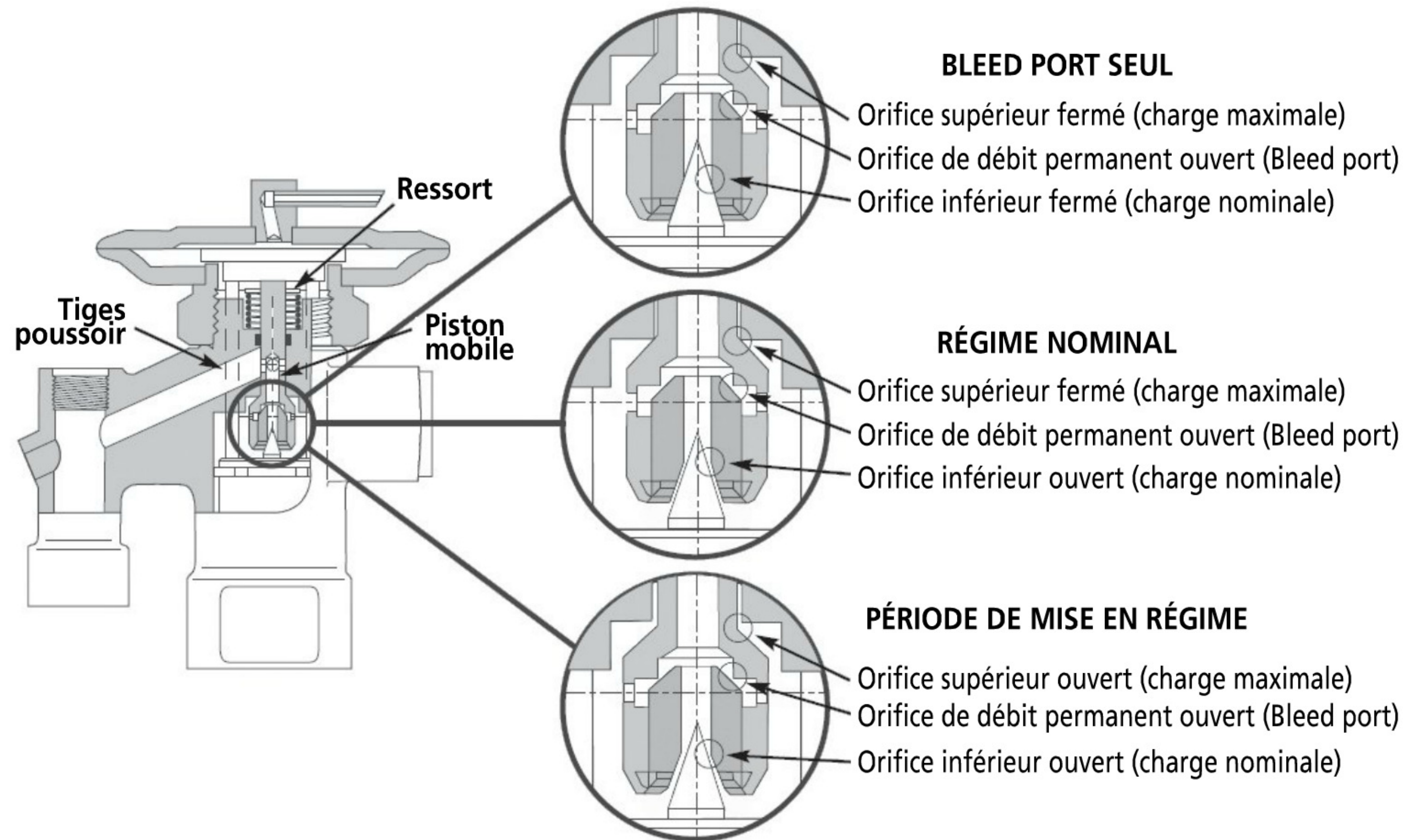


Figure 7.6 Détendeur à trois orifices (avec *bleed port*) (Doc. SPORLAN).

7.3 Détendeur électrique

Le fonctionnement d'un détendeur électrique s'apparente au détendeur thermostatique. Le bulbe est remplacé par un capteur de température et la prise de pression d'évaporation est réalisée soit par un capteur de pression, soit directement par un capteur de température.

Les capteurs sont raccordés à un régulateur électronique qui pilote la vanne faisant office de détendeur. L'avantage du régulateur électrique est d'utiliser un algorithme PID et d'améliorer le temps de réaction du régulateur. La distinction principale de ces types de détendeurs porte sur la vanne utilisée pour effectuer la détente. On distingue :

- les vannes Tout Ou Rien,
- les vannes pas à pas,
- les vannes magnétiques.

7.3.1 Les vannes Tout Ou Rien

Il s'agit d'une vanne bon marché à mise en œuvre facile. Les vannes Tout Ou Rien sont commandées par le régulateur par train de n secondes ouvertes pour x secondes fermées.

L'inconvénient majeur de ce type de vanne réside dans les coups de bélier que peut engendrer la vanne lors de son ouverture et fermeture car on agit directement sur la totalité du K_v.

7.3.2 Les vannes pas à pas

Il s'agit d'une vanne élaborée où la rotation du moteur, réalisant l'ouverture à la fermeture, est divisée en un grand nombre de pas. Le régulateur peut positionner assez précisément la vanne pour obtenir la puissance souhaitée.

Certains de ces types de détendeurs présentent l'inconvénient de rester dans la position qu'ils occupent, par exemple ouvert, en cas de coupure de courant. Il faut dans ce cas rajouter une vanne électromagnétique en amont du détendeur ce qui supprime un des avantages du détendeur électrique qui est de faire office de vanne électromagnétique.

7.3.3 Les vannes magnétiques

Il s'agit sans doute de la vanne la plus élaborée car le régulateur peut la positionner instantanément dans la position désirée.

La vanne est en fait une sorte de vanne électromagnétique dont la bobine, selon la tension appliquée, positionne le noyau dans une position variable.

Ce type de vanne présente cependant l'inconvénient de rester de faible puissance ce qui limite sa plage d'application.

7.4 Détendeur industriel

7.4.1 Les flotteurs

Le principe des détendeurs à flotteurs, dont la plage de fonctionnement est donnée en figure 7.7, porte sur le système de la chasse d'eau où la montée du fluide provoque l'élévation d'un flotteur qui agit sur le mécanisme d'ouverture ou de fermeture d'un orifice. Il existe deux types de flotteurs :

- le flotteur BP,
- le flotteur HP.

Dans le cas du flotteur BP, l'élévation du flotteur va fermer l'orifice de passage du fluide frigorigène alors que dans le cas du flotteur HP, c'est l'inverse.

Remarque

Ces détendeurs gardent leur capacité même à faible débit. Cette particularité est très intéressante pour fonctionner avec des HP flottantes relativement basses.

Flotteur BP

Le flotteur BP se positionne au niveau de la capacité à contrôler. Il s'agit dans ce cas d'un réglage de niveau (figure 7.8).

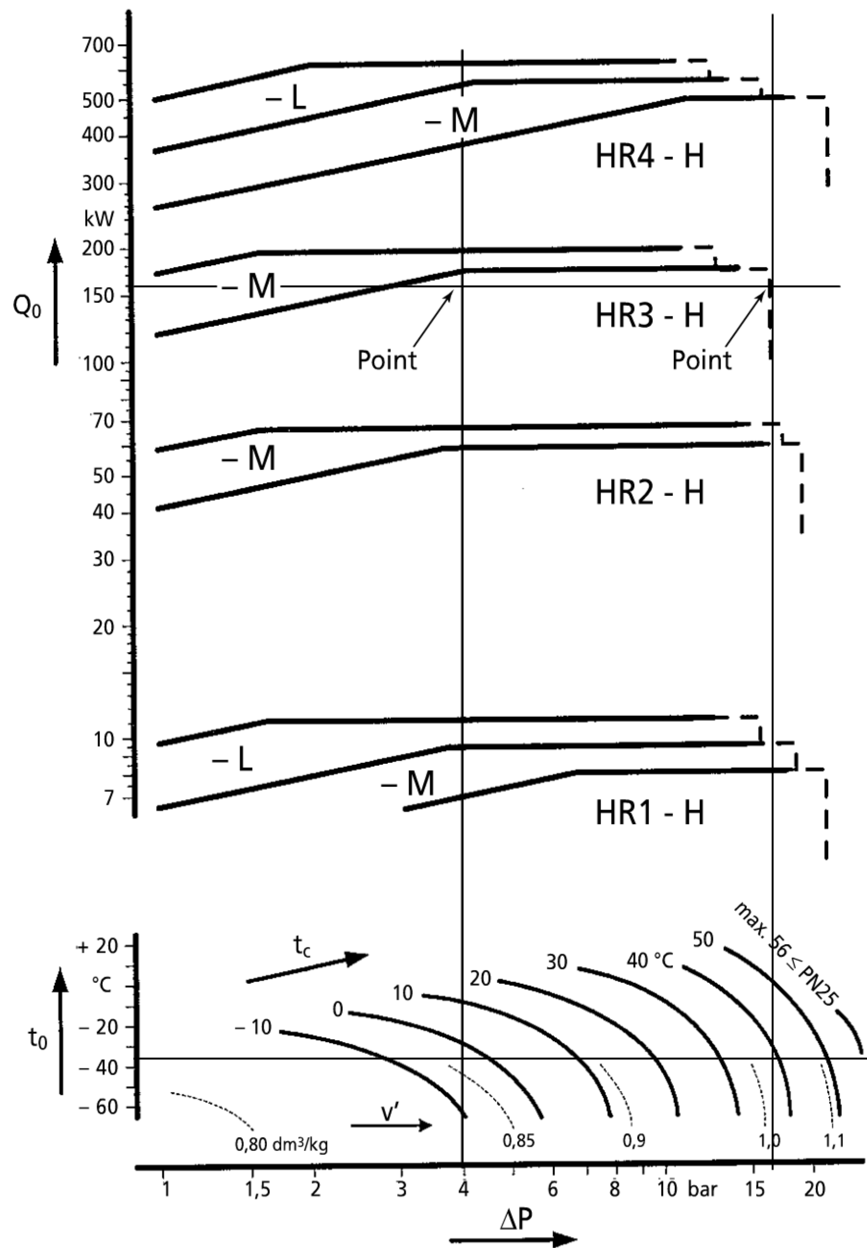


Figure 7.7 Plage de fonctionnement de détendeurs à flotteur (Doc. WITT).

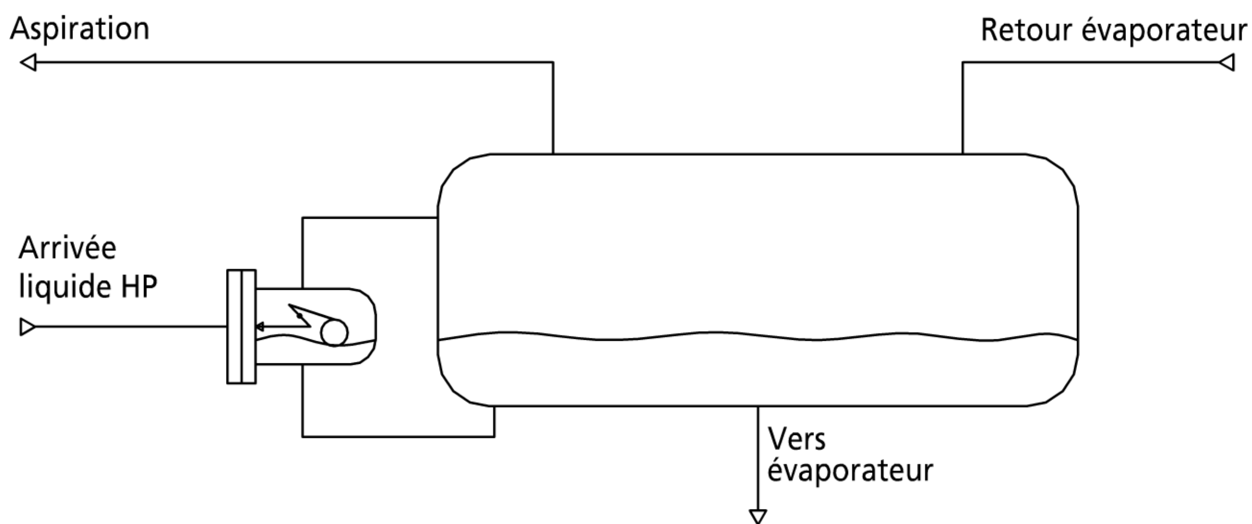


Figure 7.8 – Implantation d'un purgeur BP.

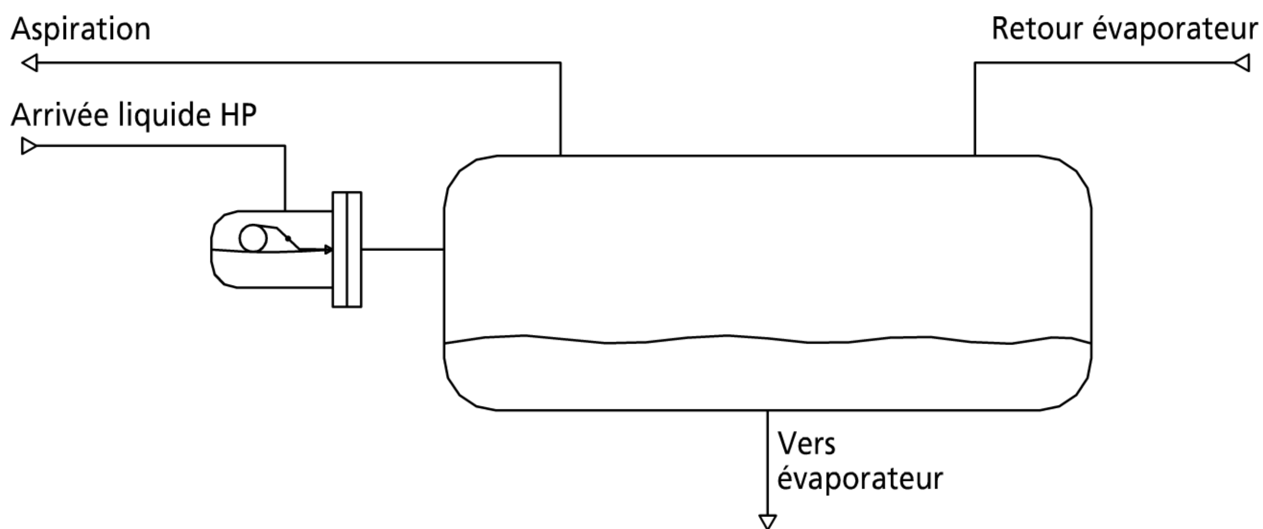


Figure 7.9 – Implantation d'un purgeur HP.

Flotteur HP

Dans l'utilisation du flotteur HP, l'objectif est d'évacuer toute quantité de liquide HP arrivant du condenseur. Compte tenu de son utilisation, on retrouve le nom de purgeur pour designer ce détendeur dans la littérature technique (figure 7.9).

Bien que le mécanisme soit relativement simple, on pourrait penser que le système l'est aussi. En fait, le fonctionnement du purgeur est assuré grâce à un dégazage permanent entre la HP et la BP ce qui évite les tampons de vapeur qui pourrait freiner l'arrivée du liquide (figure 7.10).

Remarque

Une technique simple pour fermer le purgeur consiste à empêcher le dégazage. Cette dernière technique est couramment utilisée pour fermer le purgeur à l'arrêt de la machine frigorifique.

7.4.2 Les vannes pilotées

Une alternative à l'utilisation de flotteur consiste à remplacer le flotteur HP ou BP par un flotteur de très faible capacité servant de pilote et une vanne principale faisant office de détendeur.

Utilisation en contrôle de niveau BP

Voir figure 7.11.

Utilisation en contrôle de niveau HP

Voir figure 7.12.

Notons que l'utilisation de cette vanne nécessite de disposer d'un niveau liquide HP ce qui n'est pas le cas avec l'utilisation d'un purgeur HP.

Remarque

La vanne de détente doit être adaptée pour son ΔP nominal. Certains fabricants ont une vanne universelle et il convient d'adapter le ressort interne en fonction du ΔP de fonctionnement du détendeur.

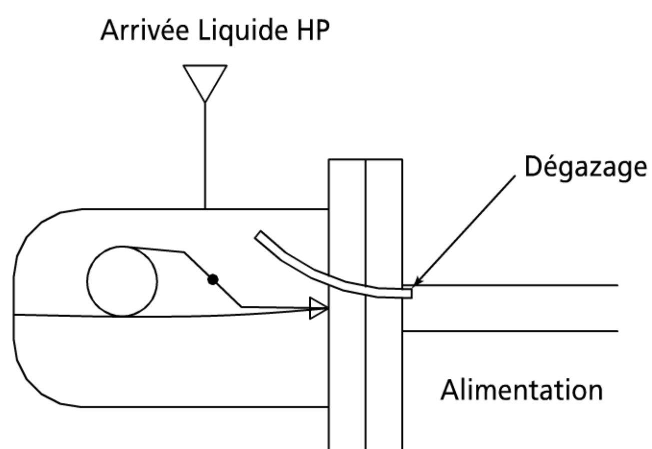


Figure 7.10 Schéma de principe d'un purgeur HP.

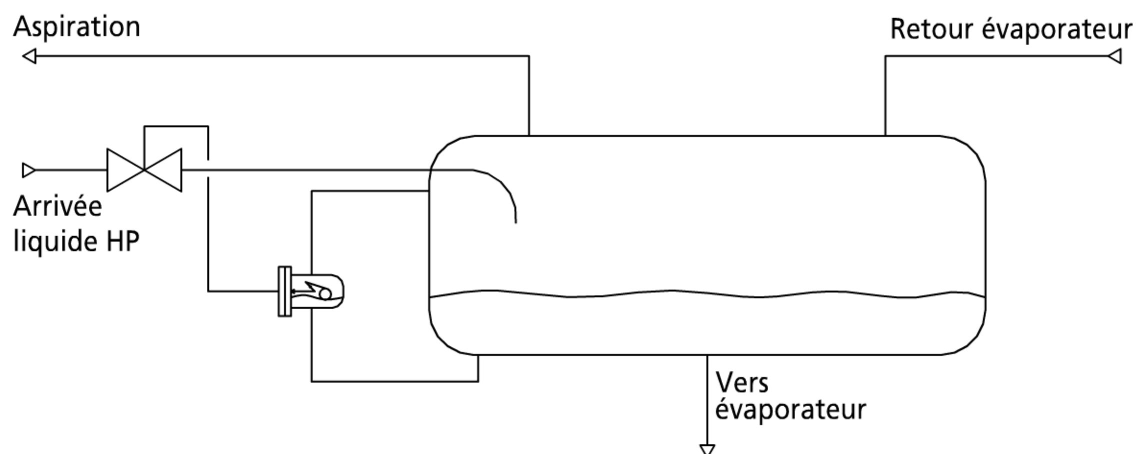


Figure 7.11 Implantation d'une vanne pilotée en montage BP.

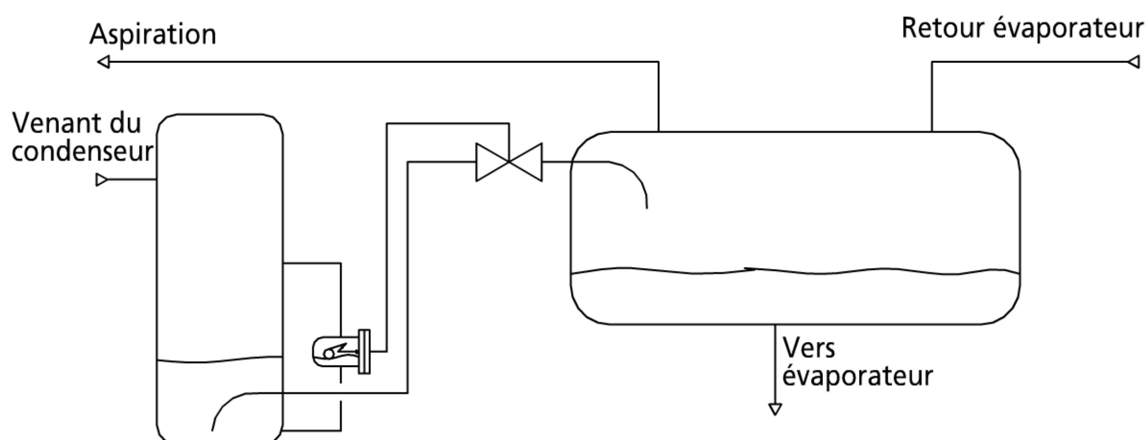


Figure 7.12 Implantation d'une vanne pilotée en montage HP.

8 L'alimentation en fluide frigorigène

Ce chapitre traite des alimentations en fluide frigorigène sans surchauffe. La réfrigération industrielle emploie fréquemment ces types d'alimentations de fluide frigorigène qui permettent l'utilisation complète de la surface d'échange des échangeurs. Cependant, ces dernières années ont vu apparaître l'utilisation de ces techniques dans d'autres domaines tels que la climatisation (refroidisseur de liquide par exemple).

8.1 Flood (thermosiphon)

L'alimentation en Flood est couramment utilisée en froid industriel lorsque l'on dispose d'une capacité de fluide frigorigène qui peut, de par sa hauteur hydrostatique, combattre la perte de charge du circuit. La hauteur hydrostatique devra donc combattre la somme des pertes de charge du circuit Flood soit :

- la perte de charge de l'évaporateur,
- la perte de charge des tubes (linéaires et singulières).

Le Flood possède un taux de recirculation compris entre 1,1 et 1,3. C'est-à-dire qu'une fraction liquide, venant de l'évaporateur, retourne à la capacité.

Remarque

Il est important d'ajuster correctement la hauteur aux besoins car une hauteur excessive et inutile peut provoquer l'inverse du but recherché notamment en élevant la pression d'évaporation du fluide à l'entrée de l'échangeur par la hauteur hydrostatique et donc réduire le ΔT.

Le raccordement d'un évaporateur Flood s'effectue toujours à co-courant car c'est le fluide chaud qui sert de moteur à la circulation du fluide froid.

8.1.1 Flood sur évaporateur

L'alimentation en fluide frigorigène de la capacité est réalisée par un flotteur HP ou BP, ou encore une vanne pilotée. La capacité (figure 8.1) est généralement équipée des équipements suivants :

- un niveau haut : protège les compresseurs contre les coups de liquide,
- un voyant liquide ou niveau givrant,
- une soupape double sur vanne trois voies,
- un système de retour d'huile.

Remarque

À l'arrêt du compresseur, l'évaporation s'arrête, ce qui remplit l'échangeur en fluide frigorigène. Le niveau liquide est alors faible voire invisible.

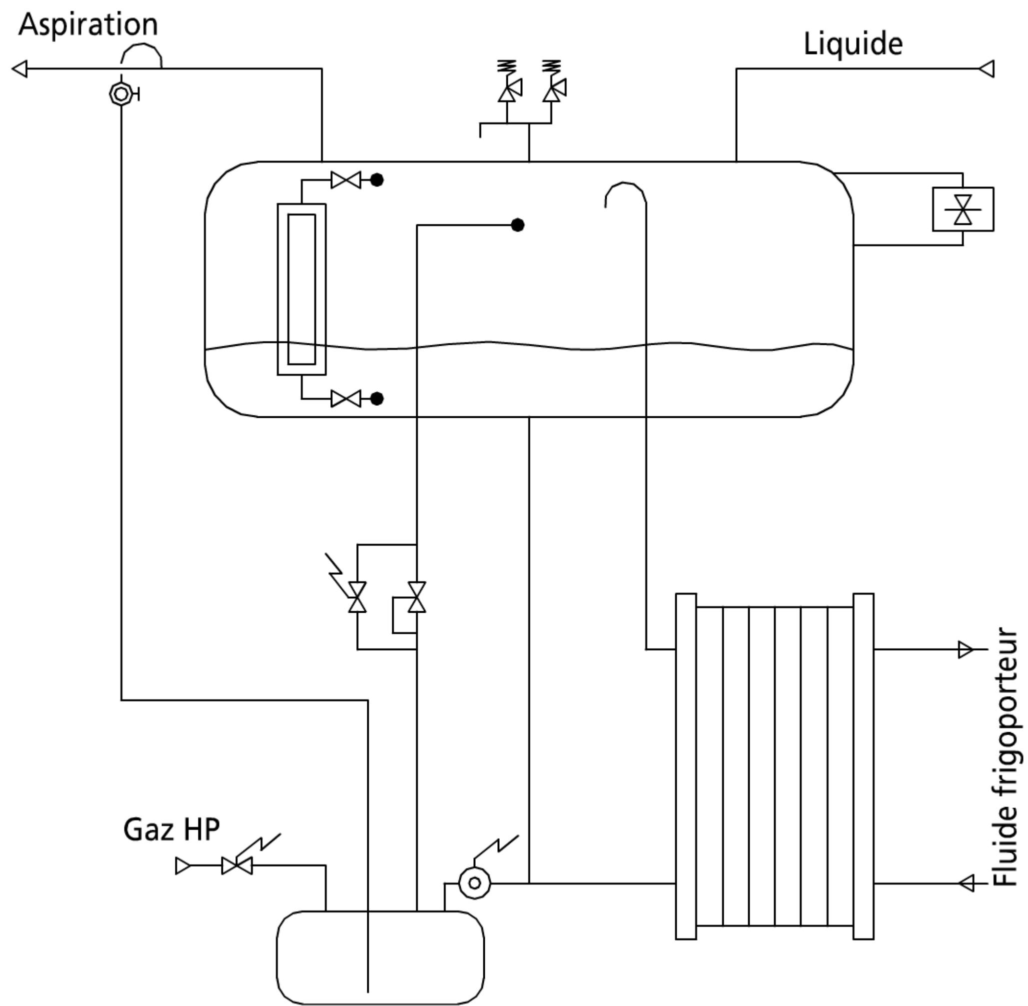


Figure 8.1 Schéma d'un système Flood BP.

8.1.2 Flood sur refroidisseur d'huile

Le refroidissement d'huile en Flood comprend deux circuits (figure 8.2) :

- le premier circuit est constitué de l'échangeur d'huile, la réserve de liquide HP et des tubes de connexion,
- le second circuit est réalisé avec le condenseur, la réserve liquide HP et les tubes de liaison.

Dans les deux cas, les circuits sont régis par la loi que les hauteurs hydrostatiques doivent vaincre les pertes de charges de leur circuit respectif. On obtient ainsi les équations de fonctionnement suivantes :

H1 = pdc ligne A + pdc refroidisseur d'huile
+ pdc ligne B + éléments connexes

H2 = pdc ligne C + pdc condenseur + pdc ligne D + éléments connexes

La régulation du refroidissement d'huile s'effectue en général par deux solénoïdes. La première de faible section est commandée par le thermostat contrôlant la température d'huile. La deuxième s'ouvre quelques secondes après la première.

La première vanne solénoïde a pour objet d'éviter les coups de bélier que l'on obtiendrait si on pilotait directement la deuxième vanne solénoïde.

Remarque

Le piquage de la tuyauterie vapeur venant de la réserve liquide HP et allant à l'entrée du condenseur doit impérativement être réalisé en pied-de-biche à 45° dans le sens du fluide afin d'éviter les oppositions de flux préjudiciable au fonctionnement du Flood.

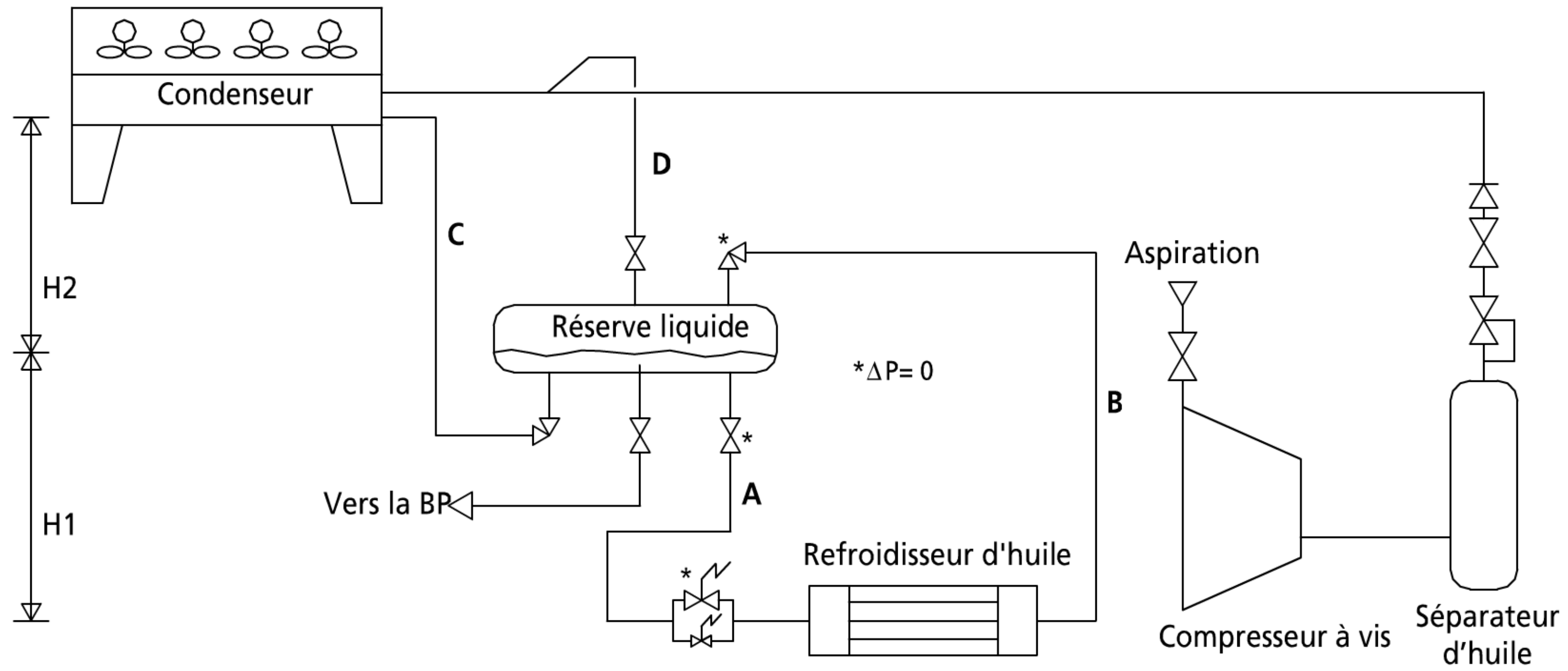


Figure 8.2 Schéma d'un système Flood sur l'huile.

8.2 Régime noyé

L'alimentation en régime noyé du fluide frigorigène consiste à noyer l'échangeur par le fluide frigorigène. La protection contre les coups de liquide est effectuée dans une zone dite « domaine de vapeur ».

Un organe de contrôle de niveau commande une électrovanne associée à un orifice de détente qui admet le fluide dans l'échangeur (figure 8.3).

La régulation de niveau est réalisée soit avec un contrôleur de niveau, soit avec un thermostat/pressostat de niveau (figure 8.4). Ce dernier est équipé d'un bulbe contenant un élément chauffant. Dès la disparition du liquide en contact avec le bulbe, celui-ci se réchauffe rapidement et enclenche un contact sec.

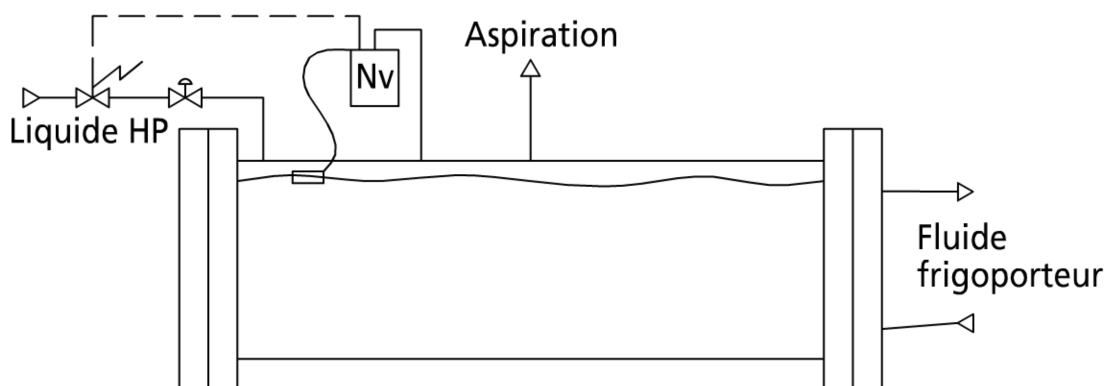
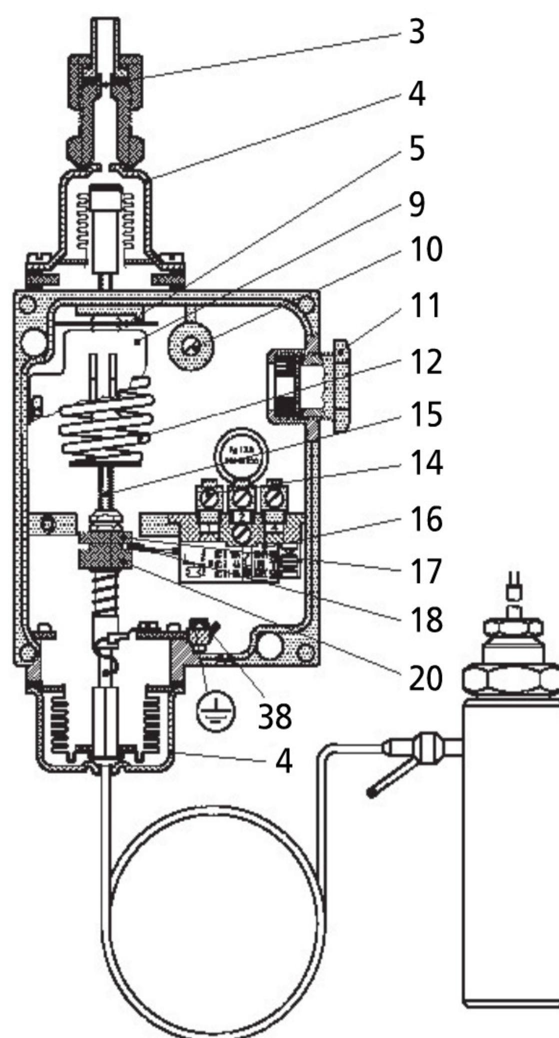


Figure 8.3 Schéma d'un système noyé.

Remarque

Bien que la technique d'alimentation des échangeurs en fluide frigorigène noyé soit relativement ancienne, ces dernières années ont vu apparaître des refroidisseurs de liquide à usage de climatisation utilisant cette technique. Grâce à l'optimisation de la surface d'échange, ces refroidisseurs de liquide possèdent une efficacité énergétique bien plus élevée vis-à-vis des autres concurrents dans la même gamme.



Conception
Fonctionnement

3. Raccord de pression
4. Élément de soufflet
5. Disque de réglage
9. Échelle
10. Borne de bouclage
11. Raccord tube électrique de 13,5
12. Ressort
14. Bornes de raccordement
15. Tige
16. Système de contact (17-4030)
17. Rouleau d'entraînement supérieur
18. Bras de contact
20. Rouleau d'entraînement inférieur
38. Vis de terre

Figure 8.4 Détail d'un thermostat/pressostat de niveau (Doc. DANFOSS).

8.3 Fluide frigorigène pompé

L'alimentation en fluide pompé permet de s'affranchir de la notion de distance et du nombre d'évaporateurs à alimenter (figures 8.5 et 8.6). Le taux de circulation peut être conséquent et ceci d'autant plus que la masse volumique du liquide est faible.

Dans les équipements frigorifiques, on trouve les éléments suivants.

La capacité

- un niveau haut : protège les compresseurs contre les coups de liquide,
- un niveau bas (option) : indique un manque de fluide frigorigène,
- un voyant liquide ou niveau givrant,
- une soupape double sur vanne trois voies,
- un système de retour d'huile.

Chaque pompe (une étant de secours)

- un jeu de manomètre (entrée/sortie pompe),
- un jeu de vanne d'isolement,
- un filtre,
- un clapet anti-retour,
- un diaphragme débit maximum,
- un diaphragme débit minimum,
- une injection gaz chaud pour le dégivrage (option),
- un pressostat différentiel protégeant de la cavitation.

Chaque batterie

- un jeu de vanne d'isolement,
- un filtre,
- une vanne solénoïde,
- un régleur,
- un système gaz chaud non représenté sur le schéma de la figure 8.6 (voir chapitre 9, « Le dégivrage »).

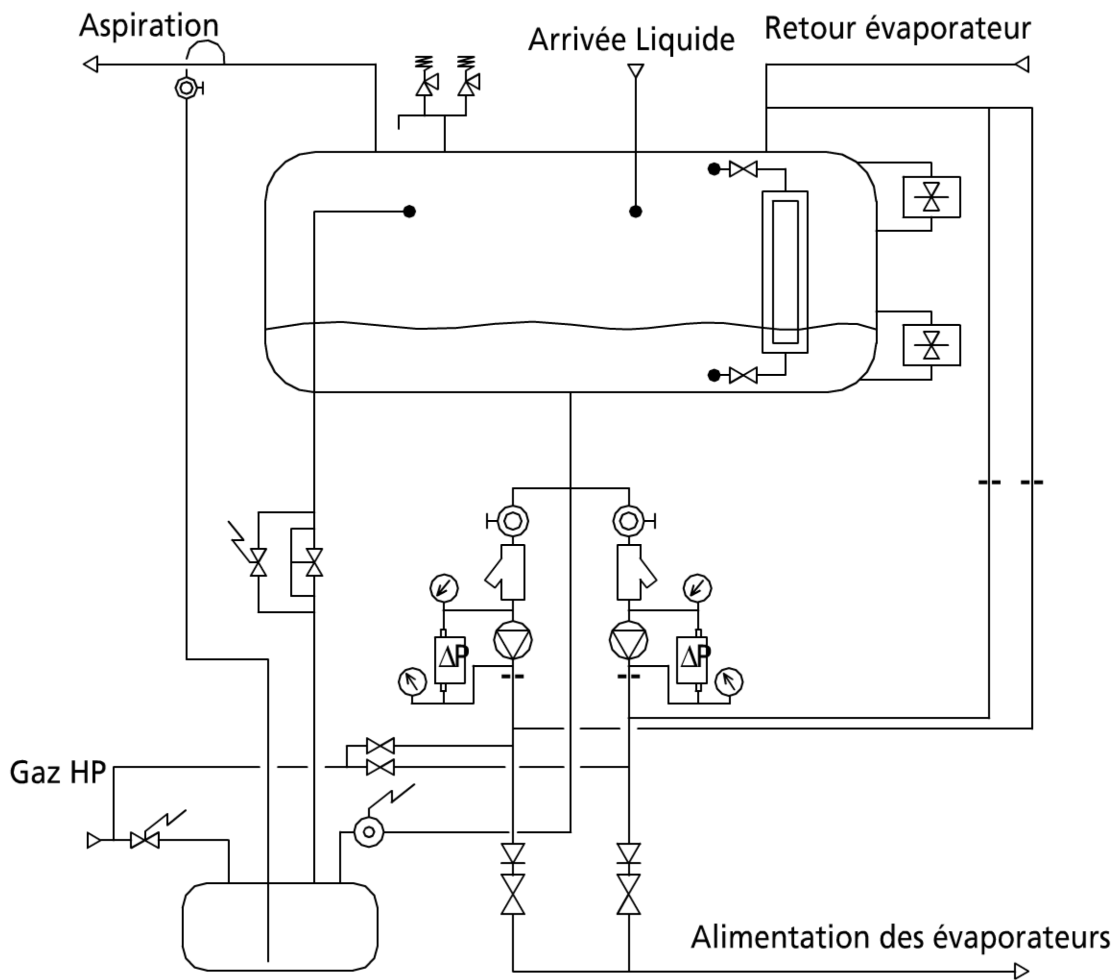


Figure 8.5 Schéma d'une station de pompage.

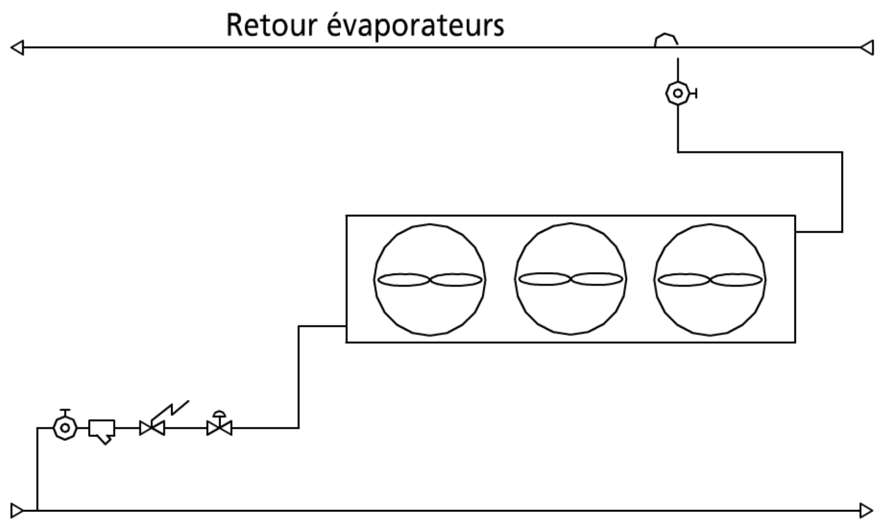


Figure 8.6 Schéma d'un poste alimenté en fluide pompé.

8.3.1 Notion de NPSH

Un des points essentiels à maîtriser porte sur le NPSH (Net Positive Suction Head) de la pompe afin de se prémunir de toute cavitation ayant des effets destructeurs sur la roue des pompes à fluide frigorigène. Il s'agit de la pression minimale à l'entrée de la pompe pour qu'il n'y ait pas de cavitation de la pompe.

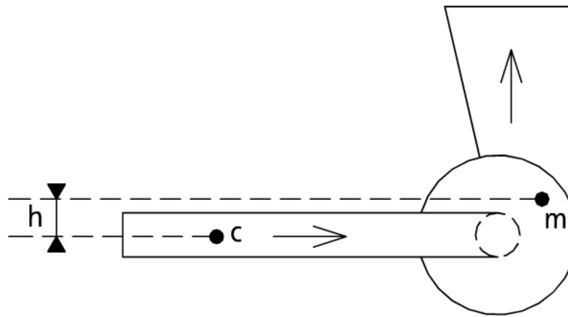


Figure 8.7 Points de pression dans une pompe.

Soit (figure 8.7) :

c = point à l'entrée de la pompe,

m = point où la pression est la plus faible au niveau des aubages,

h = hauteur négligeable.

En appliquant la formule de Bernoulli, on obtient :

$$(Pc/\rho.g) + (vc^2/2.g) + zc = (Pm/\rho.g) + (vm^2/2.g) + zm + J$$

avec :

Pc = pression au point c,

Pm = pression au point m,

vc = vitesse au point c,

vm = vitesse au point m,

zc = altimétrie au point c,

zm = altimétrie au point m,

ρ = masse volumique,

g = accélération de gravitation,

J = perte de charge entre les points c et m,

$Ps(\theta)$ = pression de vapeur saturante du fluide frigorigène.

Pour éviter la cavitation, il est nécessaire que $Pm > Ps(\theta)$.

Soit, h étant négligeable :

$$(Pm/\rho.g) = (Pc/\rho.g) + ((vc^2 - vm^2)/2.g) - J > (Ps(\theta)/\rho.g)$$

$$(Pc - Ps(\theta)/\rho.g) + ((vc^2 - vm^2)/2.g) - J > 0$$

$$(Pc - Ps(\theta)/\rho.g) + (vc^2/2.g) > (vm^2/2.g) + J$$

Le constructeur fournit la valeur $NPSHr = (vm^2/2.g) + J$.

Nous pouvons aussi calculer le valeur du $NPSHd = (Pc - Ps(\theta)/\rho.g) + (vc^2/2.g)$.

Remarque

En pratique, la hauteur hydrostatique nécessaire correspond au NPSH additionné de la perte de charge de la canalisation d'aspiration (éléments connexes compris).

8.3.2 Notion de perte de charge diphasique

Le réseau de fluide pompé comporte une partie contenant du fluide liquide et une partie contenant du fluide liquide et vapeur. Si le calcul des pertes de charge sur la partie liquide n'offre pas de réelle difficulté, il n'en est pas de même sur la partie diphasique. Or il est important de connaître la perte de charge du réseau car la méthode consistant à surdimensionner la pompe donne un résultat opposé à celui recherché.

En effet, l'excès de débit lié au surdimensionnement de la pompe provoquera un accroissement de la perte de charge sur le réseau ce qui augmentera la température d'évaporation au droit de la batterie et donc réduit le ΔT d'échange thermique.

Remarque

L'ouverture complète des régleurs au droit des batteries provoque le même résultat que celui décrit ci-dessus.

Il existe plusieurs méthodes de calcul des pertes de charge diphasiques :

- méthode homogène,
- méthode à phases séparées :
  - modèle de Lockart et Martinelli,
  - modèle Hughmark,
  - modèle Chisholm et Premoli,
  - modèle Wallis,
  - études A. Paliwoda.

Pour plus amples informations, on se rapprochera du document *Estimation des pertes de pression intratubulaire avec un monofluide* de Georges Vrinat.



Le dégivrage

Le dégivrage est une particularité de la réfrigération. Ce procédé qui consiste à faire fondre le givre recouvrant la surface d'échange de la batterie frigorifique est le garant du bon fonctionnement du système.

Une mauvaise appréciation de ce point peut conduire à rendre le système impropre à sa destination alors que la partie frigorifique est tout à fait opérationnelle. Le présent chapitre traite des techniques de dégivrage suivantes :

- dégivrage naturel,
- dégivrage électrique,
- dégivrage à l'eau,
- dégivrage gaz chaud.

Dans chacune des techniques de dégivrage présentées, il s'agit d'un exercice difficile où l'on doit faire fondre le givre contenu dans l'échangeur tout en évitant une remontée en température du médium réfrigéré. Deux critères devront guider les réglages du cycle de dégivrage :

- le nombre par jour qui est fonction du :
  - produit et son mode de conservation,
  - pas d'ailettes,
  - ΔT,
  - point de consigne,

- la durée qui dépend de la technique de dégivrage utilisée.

Certains régulateurs de dégivrage dits « intelligents » intègrent la durée du dégivrage du dernier cycle effectué pour définir le nombre d'heures espaçant le prochain dégivrage. D'autres régulateurs comportent des éléments visant à déterminer que le dégivrage est terminé (contact de givre, thermostat de fin de dégivrage, etc.) ceci dans l'objectif de remettre l'installation en fonctionnement le plus vite possible.

Remarque

Les valeurs de réglage des paramètres de dégivrage indiquées ci-dessous sont données à titre indicatif afin de pouvoir comparer les valeurs relatives entre les différents systèmes.

9.1 Naturel

Le dégivrage naturel consiste à utiliser la chaleur de l'ambiance réfrigérée pour faire fondre le givre de l'échangeur. Cette technique n'est utilisable que lorsque le medium de l'ambiance est supérieure à 0 °C, voire plus dans le cas d'une chambre froide. Il faut en effet dans ce dernier cas que l'air soit suffisamment chaud pour réaliser un dégivrage sans dérapage de la température interne de la chambre froide.

On obtient alors une équation où l'on a d'un côté les charges à combattre pour maintenir la chambre à température et de l'autre coté, la chaleur absorbée par le givre fondant.

En pratique, on sait par empirisme que cette équation est équilibrée si la température de la chambre froide est au-dessus de + 2 °C et si on maîtrise le nombre de dégivrages et leur durée.

Exemple de réglage du dégivrage d'une chambre froide à + 2/+ 4 °C

- Nombre de dégivrages par jour : 4.
- Durée = 45 minutes.

9.2 Électrique

Le dégivrage électrique, sous-entendu par résistance(s) électrique(s), est le système le plus communément installé dès que la température du médium n'est plus suffisante pour assurer un dégivrage naturel.

Il s'agit d'un système peu coûteux à l'investissement, facile d'installation mais dont il faudra payer l'énergie électrique dans les coûts d'exploitation.

Les résistances de dégivrage peuvent être localisées dans la batterie, dans le bac d'écoulement et dans l'écoulement. On peut également en disposer au droit des viroles des ventilateurs. Dans chacune de ces localisations, il peut y avoir une ou plusieurs résistances couplées ensembles selon la tension employée.

La séquence de dégivrage doit être particulièrement bien ajustée pour éviter les surchauffes pouvant provoquer des vapeurs allant se condenser sur les plafonds et autre parties froides ainsi que le réchauffement de la chambre froide.

Dans le logigramme de la figure 9.1, on utilise un thermostat comme fin de dégivrage. Lorsque la température de la batterie s'élève, cela indique que l'on a franchi le palier de chaleur latente imposée par le givre et que par conséquent, le dégivrage est terminé.

Notons que ce système est perfectible *via* l'ajout d'un temps d'égouttage entre la fin d'alimentation des résistances et la mise sous tension de la vanne magnétique. L'égouttage permet à l'eau de s'écouler par l'évacuation avant le redémarrage du mode « réfrigération ». Le schéma électrique 9.2 donne la fonctionnalité du logigramme 9.1.

Remarque

Les résistances électriques, notamment les cordons chauffants, représentent 80 % des pannes se produisant dans les chambres froides qui en sont équipées. Il est impératif de positionner un disjoncteur différentiel sur la puissance pour éviter que l'installation soit entièrement hors tension en cas de résistance à la masse.

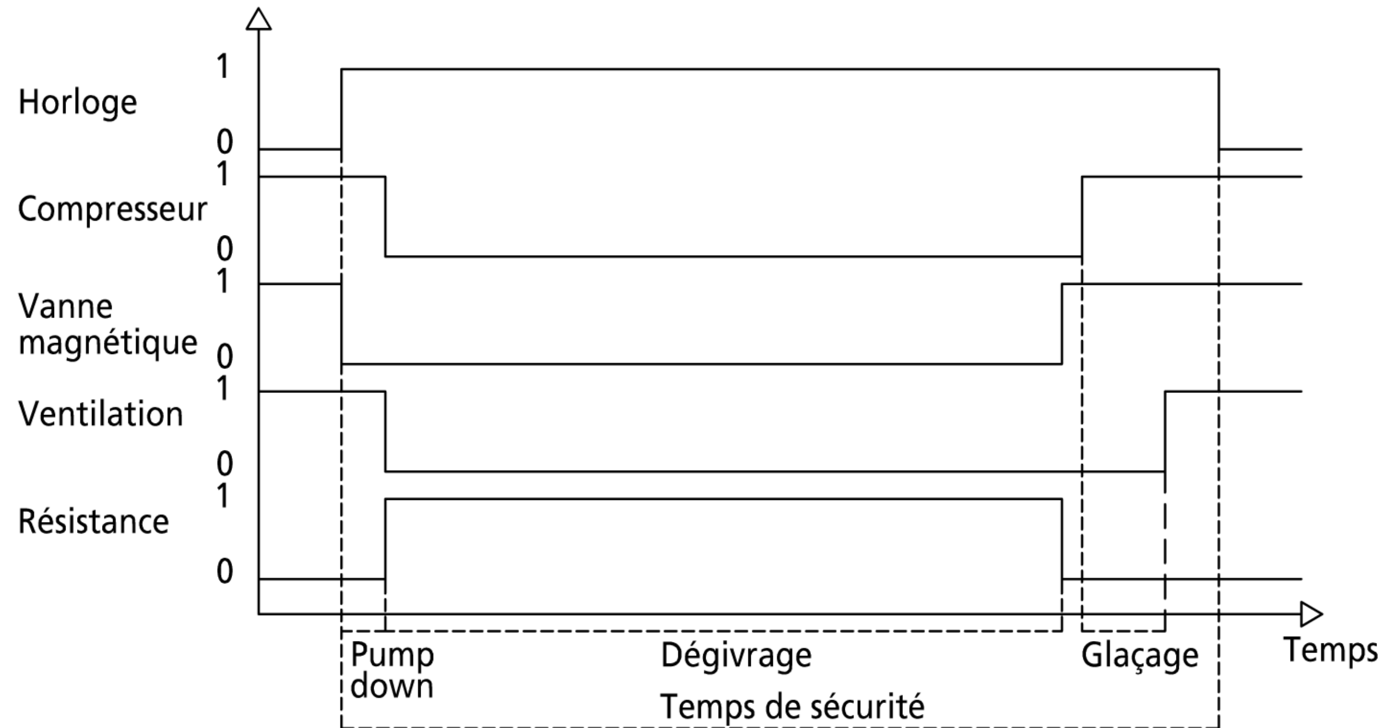


Figure 9.1 Logigramme d'un dégivrage électrique (état en fonction du temps).

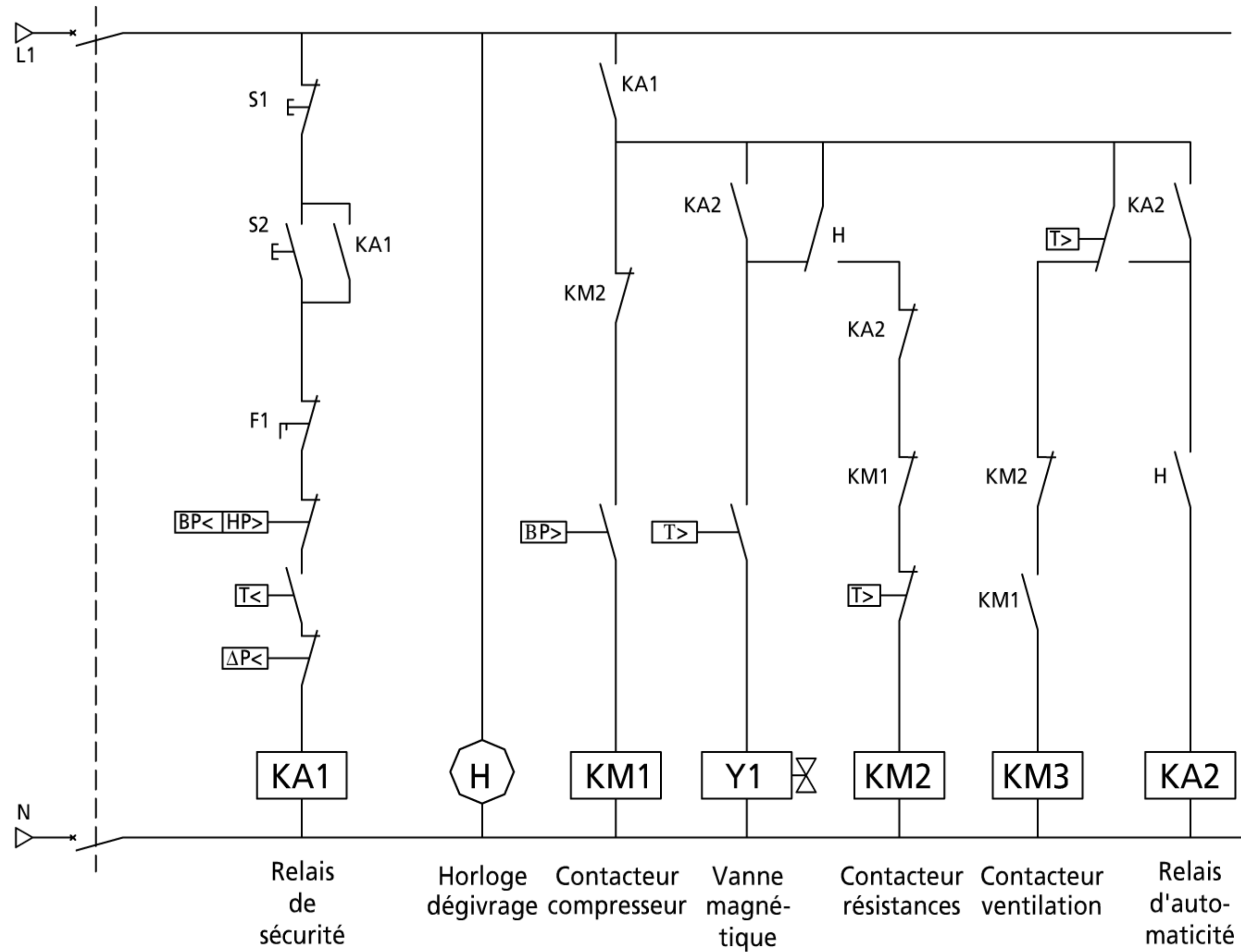


Figure 9.2 Schéma électrique d'un système à dégivrage électrique.

Le dégivrage électrique est une technique particulièrement pénalisante car les résistances chauffent les tubes par l'extérieur, ce qui favorise les déperditions dans l'air ambiant du local réfrigéré.

Pour éviter cet inconvénient en froid industriel, on enferme l'évaporateur dans un caisson durant la phase de dégivrage tout en laissant la ventilation active afin d'accélérer la phase (figure 9.3).

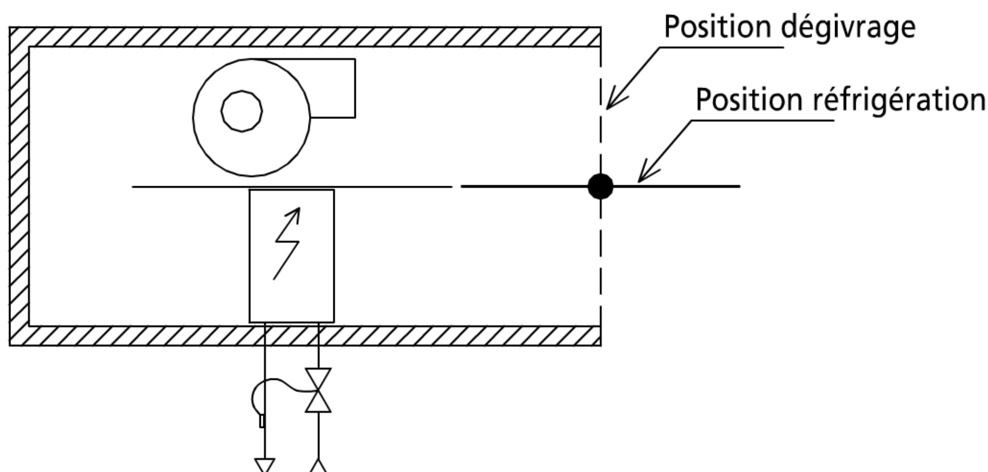


Figure 9.3 Batterie à caisson isolé.

Ce système reste cependant coûteux et peut être substitué par des techniques intermédiaires telles que des volets motorisées ou dynamiques à l'aspiration et/ou des « shut-up » (chaussettes textiles d'environ 1 m) au soufflage des ventilateurs.

Exemple de réglage du dégivrage d'une chambre négative à – 23/– 25 °C

- Nombre de dégivrages par semaine : 4.
- Durée = 25 minutes.

9.3 À l'eau

Bien que peu courant, le dégivrage à l'eau est très efficace. Il est destiné aux évaporateurs industriels en application négative.

Il consiste à envoyer de l'eau durant le cycle de dégivrage dans une rampe positionnée dans la batterie ou dans le caisson (figure 9.4).

Le dégivrage à eau présente toutefois l'inconvénient du coût d'eau et du risque lié à un écoulement bouché. Il y a lieu de noter que dans ce dernier cas, la masse d'eau projetée dans la chambre froide va rendre celle-ci inutilisable par la glace sur le sol et les produits.

Exemple de réglage du dégivrage d'une chambre négative à – 23/– 25 °C

- Nombre de dégivrages par semaine : 4.
- Durée = 10 minutes.

Remarque

Une attention particulière doit être apportée au réseau d'eau afin de garantir l'absence de prise en glace.

9.4 Gaz chaud

Le dégivrage gaz chaud est un des dégivrages les plus efficaces tant sur l'aspect rapidité que sur celui de l'énergie.

Le principe du gaz chaud est d'envoyer des vapeurs HP dans l'évaporateur pour que celles-ci se condensent en rejetant la chaleur de condensation. La chaleur de condensation servant à faire fondre le givre contenu sur l'échangeur.

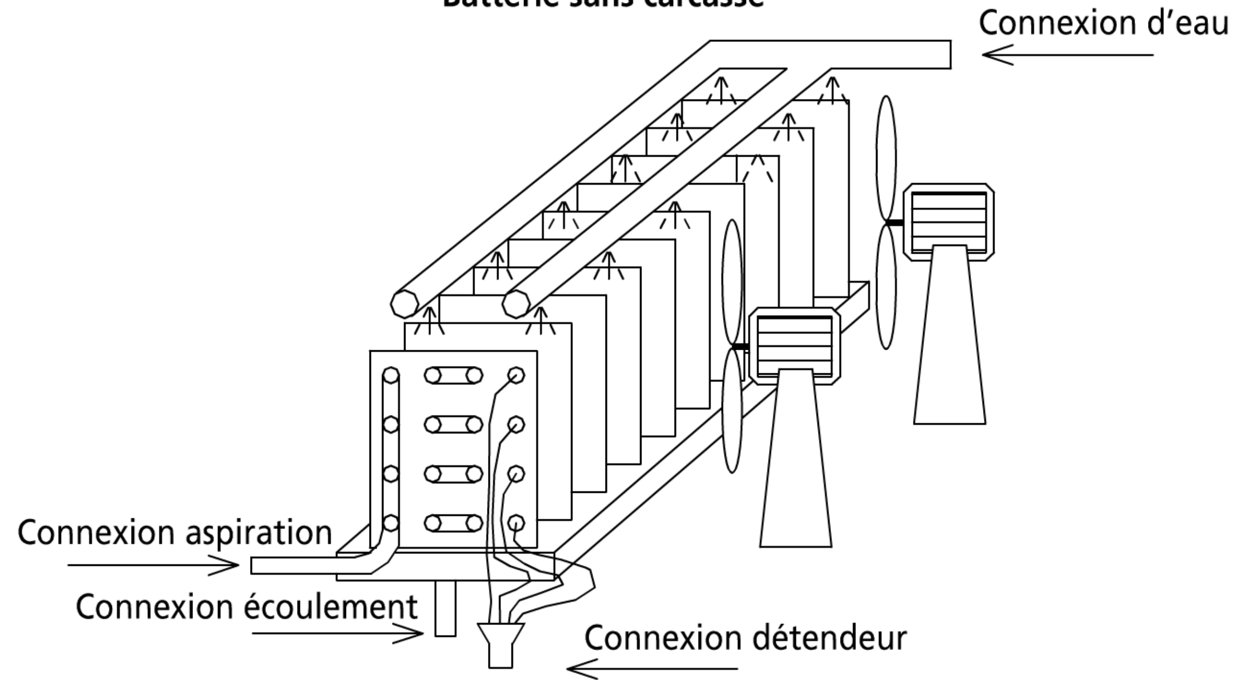


Figure 9.4 Batterie à dégivrage à eau.

Comme son nom l'indique, le dégivrage par gaz chaud nécessite des gaz chauds. C'est-à-dire à dire que ce dégivrage ne peut être utilisé que si on dispose de plusieurs postes afin qu'un certain nombre soit en production pendant que l'un dégivre.

Durant le dégivrage, l'aspiration de la batterie doit être fermée afin que les gaz chauds puissent monter en pression dans la batterie pour assurer son dégivrage.

On distingue deux systèmes de dégivrage par gaz chaud. La différence porte sur le mode de réintégration des condensats :

- par la BP (fluide pompé),
- par la HP (détente directe).

Exemple de réglage du dégivrage d'une chambre négative à – 23/– 25 °C

- Nombre de dégivrages par semaine : 4.
- Durée = 10 minutes.

9.4.1 Gaz chaud à réintégration par la BP

Dans le mode de réintégration des condensats par la BP, les gaz chauds sont renvoyés dans la tuyauterie retour des évaporateurs d'un circuit à fluide frigorigène pompé. Dans le schéma de principe (figure 9.5), on retrouve :

- une ligne d'injection de gaz chaud comprenant une vanne à mains, un filtre et une vanne solénoïde,
- une vanne à pression constante sur l'aspiration avec ouverture forcée en marche réfrigération.

La vanne à pression sera réglée à la température du dégivrage souhaitée (relation pression/température).

La technologie de la vanne à pression constante employée devra permettre en fin de dégivrage une ouverture progressive afin d'éviter les coups de bélier dans le système. Une alternative consiste à utiliser une vanne de décharge, faisant chuter la pression dans la batterie, avant l'ouverture de la vanne principale.

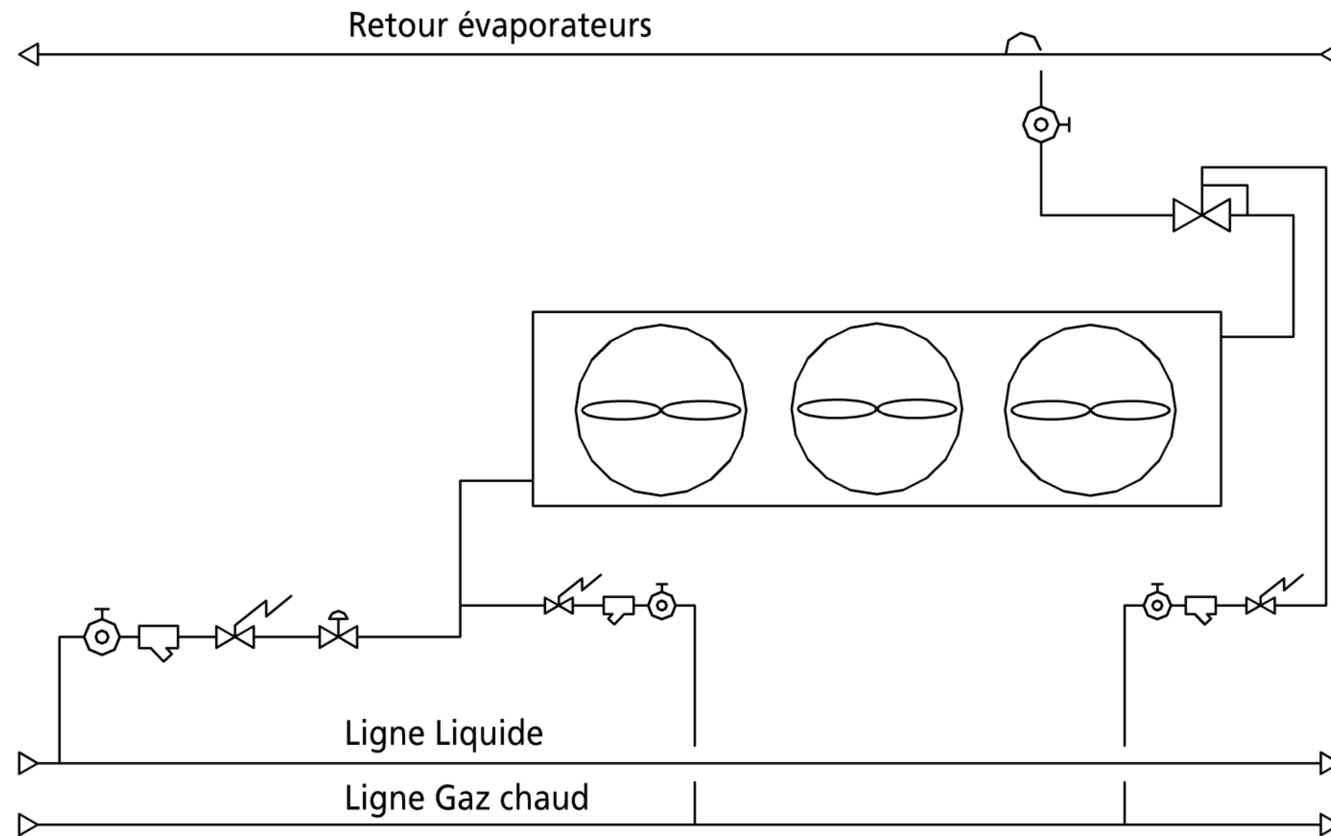


Figure 9.5 Principe du système gaz chaud à réintégration par la BP.

9.4.2 Gaz chaud à réintégration par la HP

Dans le système de réintégration des condensats dans la HP, on rejette les condensats dans la ligne liquide alimentant l'ensemble des postes en détente directe. Cette opération s'effectue en deux phases :

- on fait chuter la pression dans la ligne liquide à l'aide d'une vanne aval,
- on positionne un clapet by-passant, entre autres, le détendeur dans le sens inverse du passage du détendeur.

La vanne à pression sera réglée à la température du dégivrage souhaitée (relation pression/température).

À l'instar de la technique de réintégration par la BP, on retrouve une ligne d'injection de gaz chaud comprenant une vanne à mains, un filtre et une vanne solénoïde (figure 9.6).

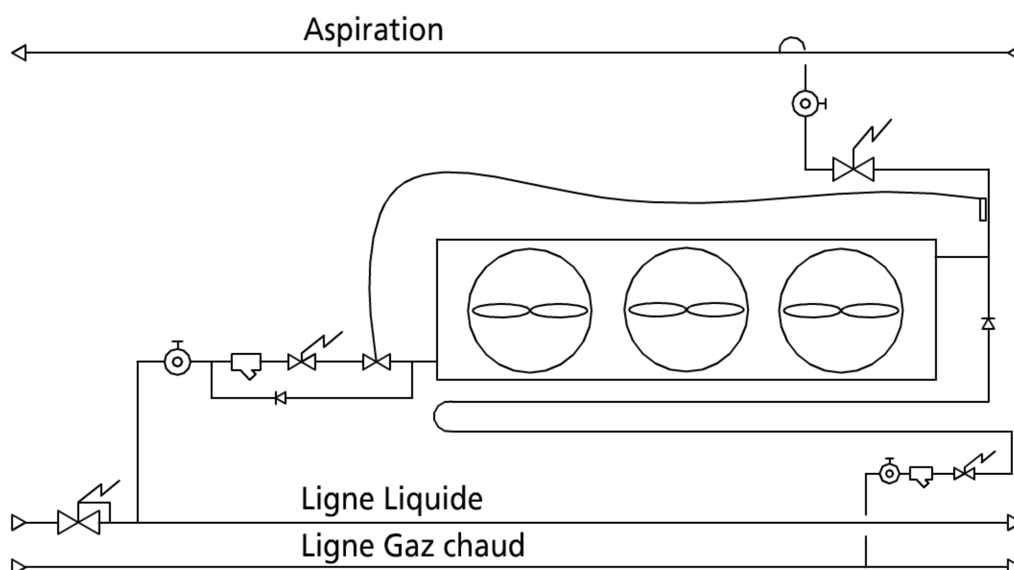


Figure 9.6 Principe du système gaz chaud à réintégration par la HP.

10 La chaîne de sécurité

La chaîne de sécurité intègre les organes de protection de l'élément considéré. Ce chapitre détaille cette chaîne en fonction du type de compresseur.

La chaîne de sécurité d'un compresseur peut comprendre les éléments suivants :

- Un pressostat BP :
  - empêche d'aspirer les pénétrations d'air (humide) dans le système en cas de fuite (si la P nominale est supérieure à la pression atmosphérique),
  - évite des pressions d'évaporation anormale pour le système.
- Un pressostat HP : empêche les surpressions à risque pour le système.
- Un relais de surchauffe (ou ipsotherm) : protège le moteur électrique contre un échauffement anormal des enroulements.

Cependant, en fonction de la technologie des compresseurs, on peut rencontrer des éléments différents et/ou supplémentaires tels que décrits ci-après.

10.1 Compresseur à pistons

Voir figure 10.1.

- **Un pressostat différentiel d'huile** : évite que le compresseur fonctionne sous une mauvaise lubrification.
- **Contrôleur électronique de niveau d'huile de compresseur** : stoppe le compresseur en cas de manque d'huile dans le carter.
- **Thermostat de refoulement** : stoppe le compresseur en cas de température de refoulement trop élevée.
- **Niveau d'huile (réserve)** : génère une alarme niveau d'huile faible.

10.2 Compresseur Scroll

Voir figure 10.2.

- **Un contrôleur de phase pour le sens de rotation** : empêche les compresseurs de tourner à l'envers.
- **Thermostat de refoulement** : stoppe le compresseur en cas de température de refoulement trop élevée.
- **Niveau d'huile (réserve)** : génère une alarme niveau d'huile faible.

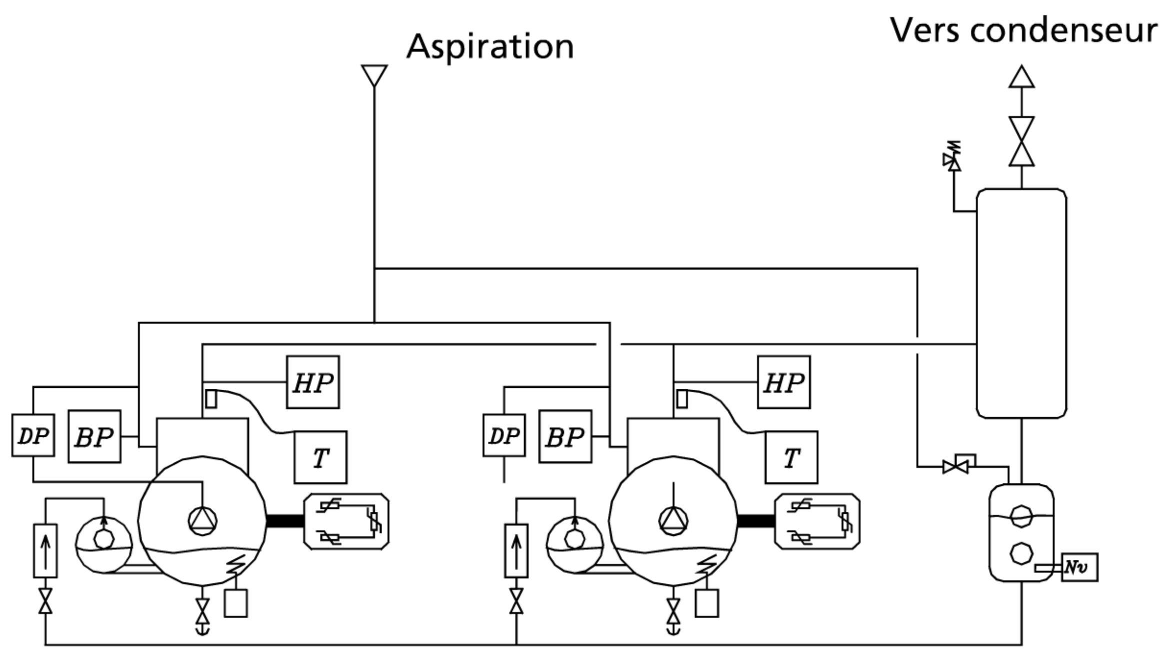


Figure 10.1 Chaîne de sécurité d'une centrale à pistons.

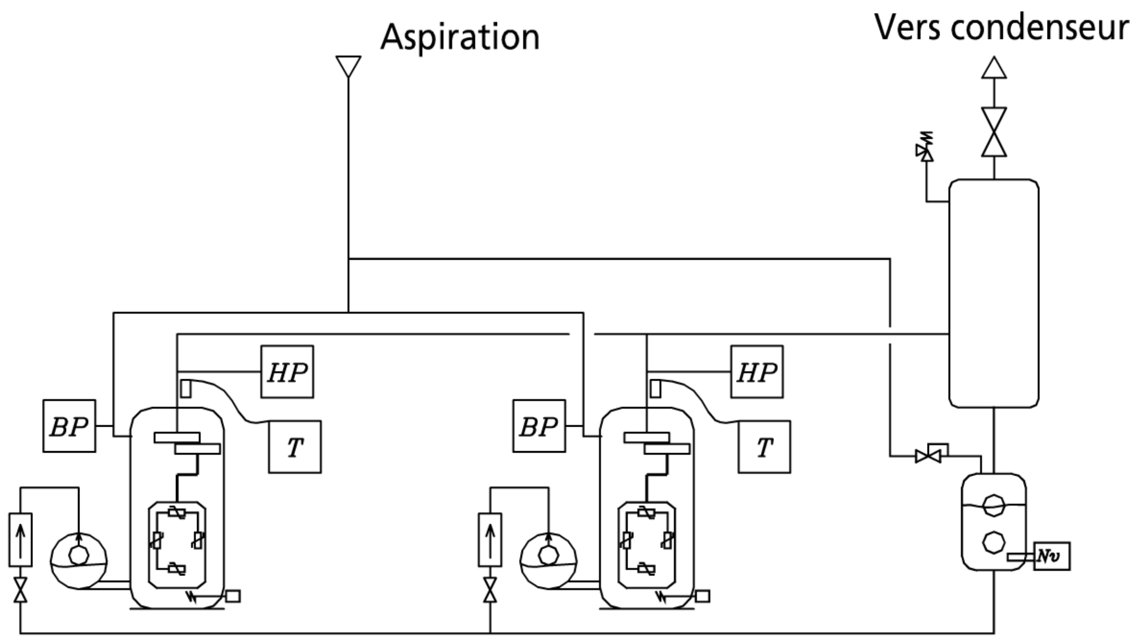


Figure 10.2 Chaîne de sécurité d'une centrale Scroll.

10.3 Compresseur à vis

Voir figure 10.3.

- **Un contrôleur de phase pour le sens de rotation** : empêche les compresseurs de tourner à l'envers.
- **Un thermostat de refoulement** : stoppe le compresseur en cas de température de refoulement trop élevée.
- **Un pressostat différentiel d'huile** : évite que le compresseur fonctionne sous une mauvaise lubrification.
- **Niveau d'huile** : stoppe les compresseurs en cas de manque d'huile dans le séparateur d'huile.
- **Un thermostat de température basse d'huile** : stoppe les compresseurs en cas d'huile trop froide.
- **Un thermostat de température haute d'huile** : stoppe les compresseurs en cas d'huile trop chaude.

Remarque

Certains compressoristes imposent un contrôleur de débit d'huile en lieu et place du pressostat différentiel d'huile.

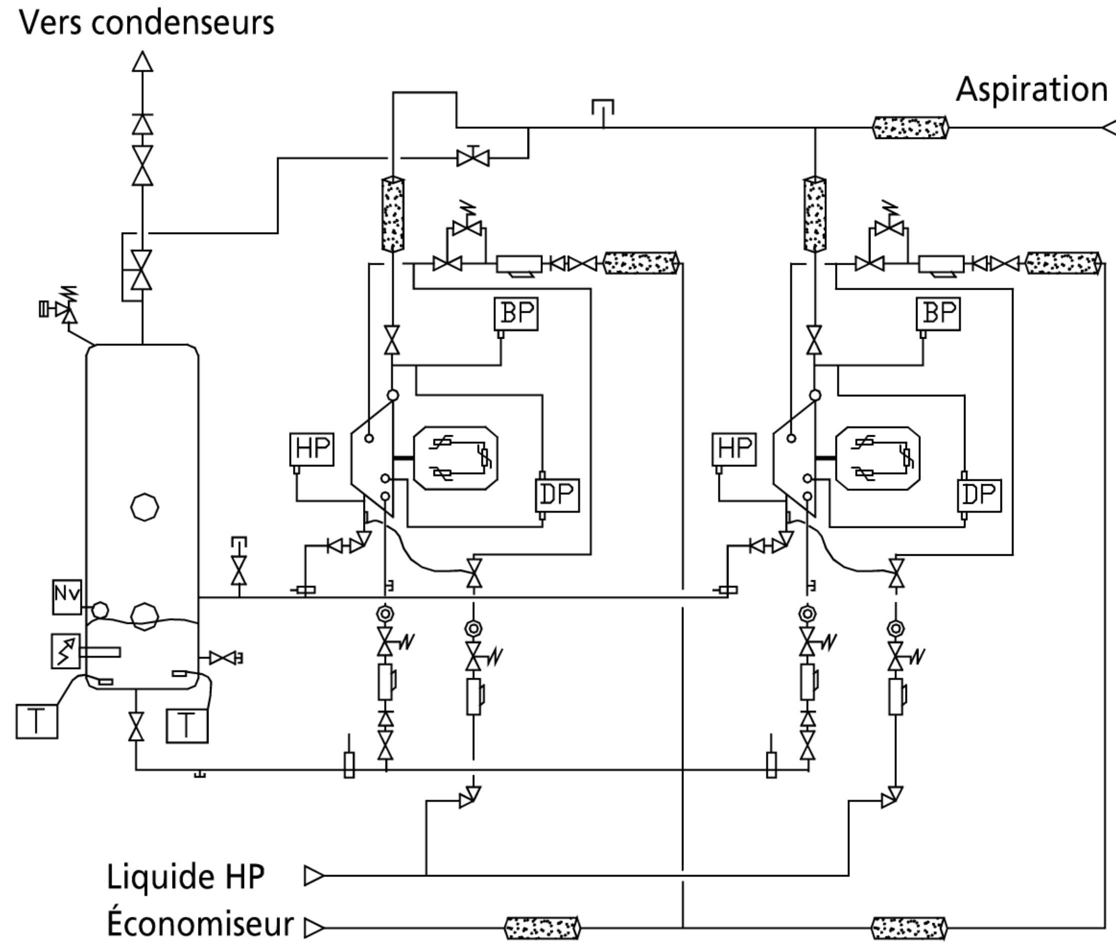


Figure 10.3 Chaîne de sécurité d'une centrale à vis.

11 La variation de vitesse

Les variateurs se généralisent depuis ces dernières années dans les applications de variation de vitesse des ventilateurs et des compresseurs. Les raisons principales de leur utilisation résident dans la souplesse de la variation de puissance et les économies d'énergie qui y sont associées.

Ce chapitre est consacré principalement à la variation de vitesse par variateur de fréquence.

11.1 Constitution

Les variateurs sont constitués des éléments suivants (figure 11.1) :

- un pont redresseur commandé ou non,
- un circuit intermédiaire,
- un onduleur,
- un circuit de commande.

Il existe plusieurs techniques de variateur de fréquence. On distingue :

- les variateurs à source de courant : CSI,
- les variateurs à modulation d'impulsion en amplitude : PAM,
- les variateurs à modulation de largeur d'impulsion : PWM.

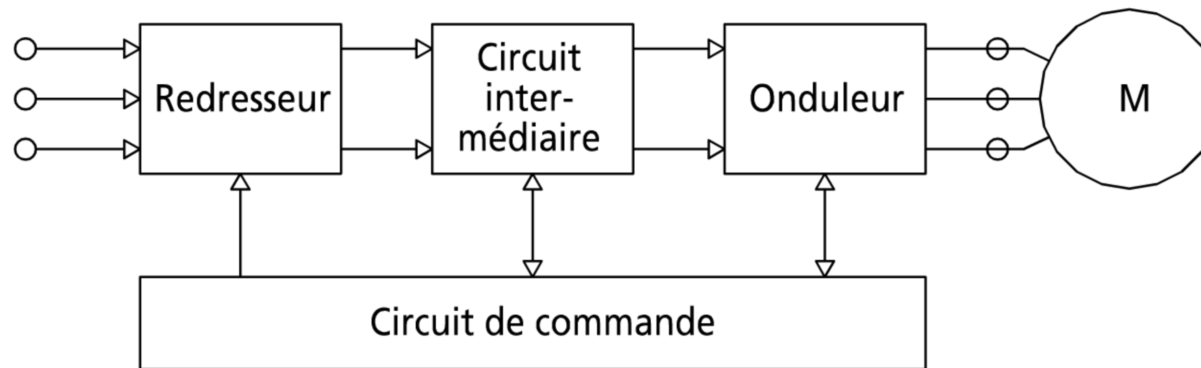


Figure 11.1 Schéma de principe d’un variateur de vitesse.

Remarque

Aujourd'hui, les variateurs sont pratiquement tous du type PWM avec pour certains constructeurs, une optimisation notable de cette technique.

11.2 La sélection

Il est impératif de déterminer l'évolution du couple de la charge en fonction de la vitesse. Cette évolution est généralement constante (compresseur) ou quadratique (ventilateur). Le variateur devra disposer d'un couple d'accélération nécessaire pour vaincre le couple résistant.

Le courant consommé par le variateur n'est pas sinusoïdal. Il comprend un fondamental, plus des harmoniques d'amplitude plus faible et de fréquences plus élevées multiple impair du fondamental rang (5, 7, 11, 13, etc.).

La longueur des câbles moteurs est déterminante dans la sélection du variateur et peut conduire à un déclassement de celui-ci. Il est impératif de vérifier la tolérance du variateur à la longueur du câble moteur et de son effet capacitif.

11.3 Précautions d'installation

Comme tout appareil électrique génère des perturbations électromagnétiques, les variateurs doivent résister à ces perturbations et ne doivent pas perturber le réseau. Ces appareils doivent être conformes à la directive CEM (Compatibilité ÉlectroMagnétique).

Le variateur doit être protégé contre les surtensions et coup de foudre appelé « transitoire ». La protection du variateur contre ces surtensions est donnée par des normes telles que la VDE0160 (norme allemande).

Le variateur génère des perturbations sur le réseau. L'importance de ces perturbations dépend de l'impédance du réseau et de l'intensité de la charge vis-à-vis de la puissance de court-circuit du réseau. Pour limiter ces perturbations, on installe des bobines self sur le circuit intermédiaire du variateur ou sur son entrée réseau.

Compte tenu que la sortie tension du variateur n'est pas du tout sinusoïdale par le principe même de découpage PWM, il existe des composantes à hautes fréquences. Ces composantes perturbent les appareillages électroniques à proximité et il est donc nécessaire de les limiter.

Une des solutions efficaces consiste à installer des filtres antiparasites composés de condensateur et de selfs hautes fréquences. Ces filtres sont appelés RFI (*Radio Frequency Interference*).

Remarque

Certains fabricants de variateur considèrent que les bobines et les filtres sont des options et il faut donc vérifier s'ils sont natifs ou non.

On utilise des câbles blindés pour limiter les bruits radioélectriques. Le blindage doit être mis à la terre aux deux extrémités (côté moteur et côté variateur) et être continu afin d'être réellement efficace. Il est important que le contact entre la terre et le blindage soit bon. Par ailleurs, il est important de séparer dans les goulottes la puissance et la commande.

Remarque

Il faut également blinder le câble du signal de consigne vitesse du variateur qui peut être du type tension (0-10 V) ou intensité (4-20 mA).

Les composants de filtres antiparasites engendrent un courant de fuite qui dans le cas d'une protection différentielle en amont, peuvent faire déclencher le disjoncteur.

Une solution technique consiste à installer un transformateur d'isolement entre la protection et le variateur ou encore de prendre un disjoncteur différentiel de calibre adapté compatible avec l'utilisation d'un variateur.

11.4 Intérêts

Le graphe de la figure 11.2 compare les différentes techniques de variation de puissance frigorifique d'un compresseur.

La variation de vitesse permet de réguler les besoins et la demande évitant ainsi :

- une dégradation des conditions de fonctionnement,
- des démarrages fréquents.

Le système le plus énergivore est la vanne de capacité by-passant le refoulement et l'aspiration du compresseur. Celui-ci absorbant toujours une puissance importante. Le système le plus performant étant la variation de fréquence.

L'explication principale de l'accroissement de l'EER est liée aux ΔT d'échange qui se réduisent dans les échangeurs avec la diminution du débit massique dans le compresseur. Le variateur possède intrinsèquement la fonction démarreur de par l'accès au réglage des rampes de montée et de descente.

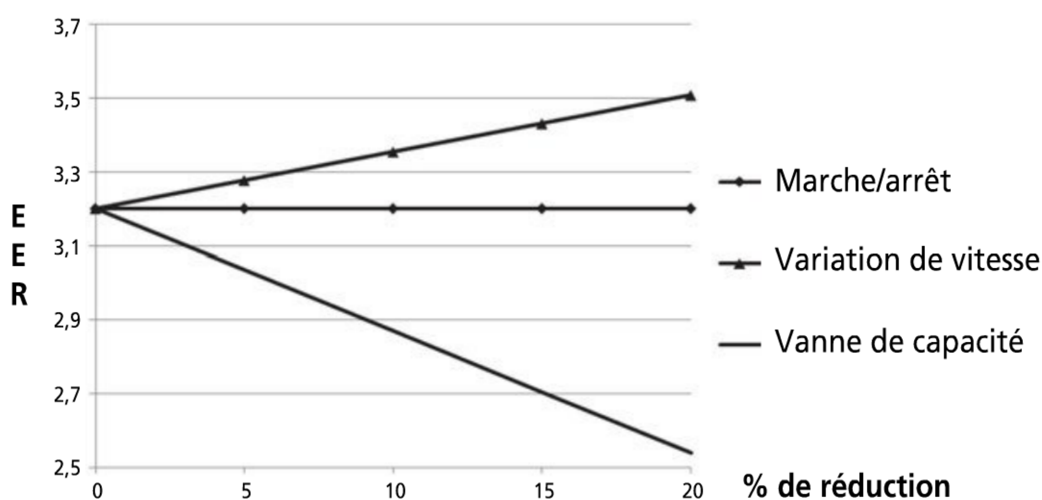


Figure 11.2 Évolution de l'EER en fonction du pourcentage de réduction de puissance selon la technique utilisée.

La gestion électronique permet au variateur d'obtenir une alarme sur des défauts du type :

- surintensité,
- défaut de tension,
- déséquilibre de phase, etc.

À la condition expresse que le variateur supporte la surintensité et que le moteur soit compatible, la fréquence peut être artificiellement augmentée de 50 à 60 Hz (voire plus selon les fabricants) .

À titre d'exemple, cet avantage permet d'augmenter de 20 % la puissance d'un compresseur au régime considéré.

11.5 Limites d'utilisation

Il est impératif de veiller au refroidissement correct du moteur à faible fréquence. L'échauffement du moteur est de surcroît augmenté de par son alimentation avec un courant non sinusoïdal bien que cet effet devienne négligeable avec les variateurs modernes.

Remarque

Le moteur devra donc être compatible pour un fonctionnement avec un variateur.

De même, il y a lieu de prendre en compte l'élément entraîné par le moteur électrique. Ainsi, dans le cas d'un compresseur à pistons, lorsque la lubrification est assurée par une pompe à huile en bout d'arbre, il y a une vitesse limite où le débit d'huile injectée devient insuffisant.

À l'instar de l'exemple ci-dessus, un ventilateur ne peut pas être régulé à 0 Hz car le couple résistant risque de bloquer le ventilateur à basse vitesse.

12 Le purgeur automatique

Les incondensables sont les principaux ennemis des circuits frigorifiques.

Un moyen de les traiter, notamment sur les installations industrielles, est le purgeur automatique.

12.1 Fonction

Le purgeur (désaérateur ou groupe de purge) a pour fonction de retirer les incondensables (principalement l'air) qui peuvent être piégés dans une installation frigorifique. Ces incondensables sont dus à plusieurs facteurs :

- mauvaise manipulation (exemple : tirage au vide partiel de l'installation),
- la qualité du fluide frigorigène injecté dans l'installation,
- installation fonctionnant sous vide (exemple : production au R717 en basse température).

C'est dans ce dernier cas où l'on trouvera majoritairement des groupes de purge automatique de par le fait qu'il s'agit d'un phénomène continu et nécessaire pour la fiabilité de l'installation. Pour les autres cas, lorsque la détection de la présence d'incondensables dans un circuit frigorifique est établie, le retour à la normale peut être plus délicat.

Pour les petits circuits l'opération consiste à remplacer la totalité de la charge.

Pour les circuits à forte charge, il est nécessaire de faire une étude spécifique afin de retirer progressivement les incondensables en conservant la charge et sans risque de rejet de fluides frigorigènes à l'atmosphère.

Les incondensables dans un circuit frigorifique provoquent une élévation de la HP par l'ajout des pressions partielles qu'ils représentent (Loi de Dalton).

Par ailleurs, une présence comme de l'air humide dans une installation frigorifique peut générer des réactions catalytiques avec les lubrifiants, des oxydations des métaux, etc.

Lors de l'élévation de HP, on constate :

- une baisse du rendement volumétrique,
- une diminution de la puissance frigorifique,
- une surconsommation,
- une augmentation de la température de refoulement.

Enfin, à l'extrême, l'élévation de haute pression agira sur les sécurités de la production frigorifique ce qui se traduira par un arrêt *via* les pressostats HP ou, en dernier lieu, une action des soupapes de sécurité.

Loi de Dalton

La pression exercée par différents gaz contenus dans un même volume est égale à la somme de leur pression partielle.

12.2 Schéma de principe

Il s'agit d'un petit circuit frigorifique destiné à condenser les vapeurs du fluide frigorifique (figure 12.1).

On note la présence des éléments suivants :

- un compresseur,
- un évaporateur,
- un condenseur,
- un solénoïde d'évacuation des incondensables à l'extérieur.

Certains éléments peuvent être rajoutés tels que : filtre, voyant, etc.

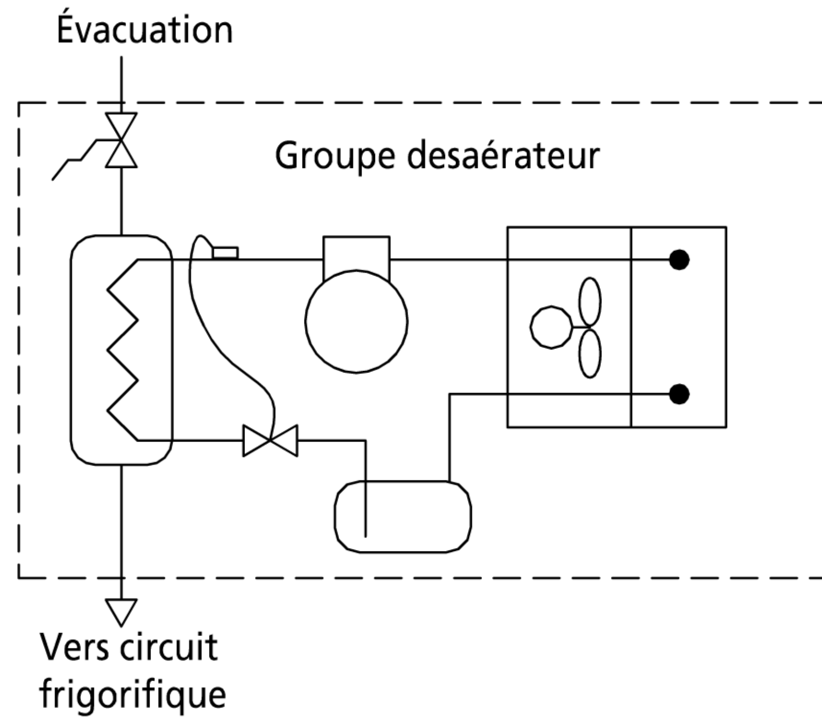


Figure 12.1 Schéma de principe d'un purgeur automatique.

12.3 Mise en œuvre

Le purgeur automatique doit être positionné à l'endroit où les incondensables sont piégés, c'est-à-dire du côté HP. Par ailleurs, le piquage devra être réalisé à un point haut relatif du circuit.

12.3.1 Sur le purgeur

Dans le cas du purgeur (détendeur à flotteur HP), le point haut se situe sur le dessus (figure 12.2).

12.3.2 Sur le réservoir

À l'instar du purgeur HP, le purgeur automatique se positionne sur le dessus du réservoir liquide (figure 12.3).

Remarque

Dans le cas d'installations complexes, plusieurs piquages peuvent être réalisés en liaison avec le purgeur automatique. Chaque piquage comporte une VEM qui est alternativement alimentée.

12.4 La recherche d'incondensables

On détecte un incondensable lorsqu'à l'arrêt de la production, coté HP, on ne vérifie pas la relation pression/température avec le medium de refroidissement qui est en équilibre thermique avec le fluide frigorigène contenu dans le condenseur.

Le graphe de logique de recherche d'incondensables est établi sur le principe indiqué en figure 12.4.

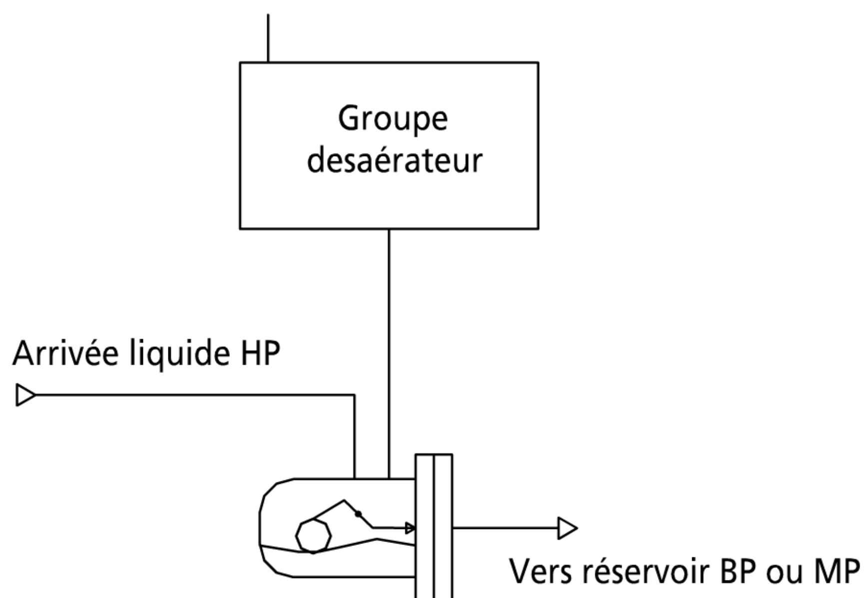


Figure 12.2 Montage sur un flotteur HP.

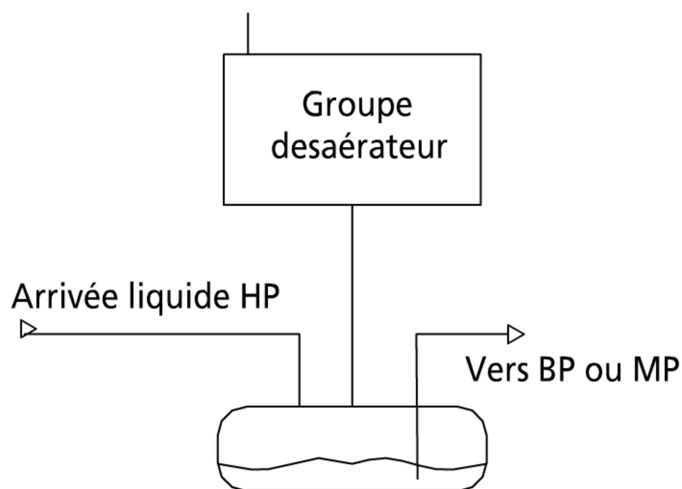


Figure 12.3 Montage sur un réservoir.

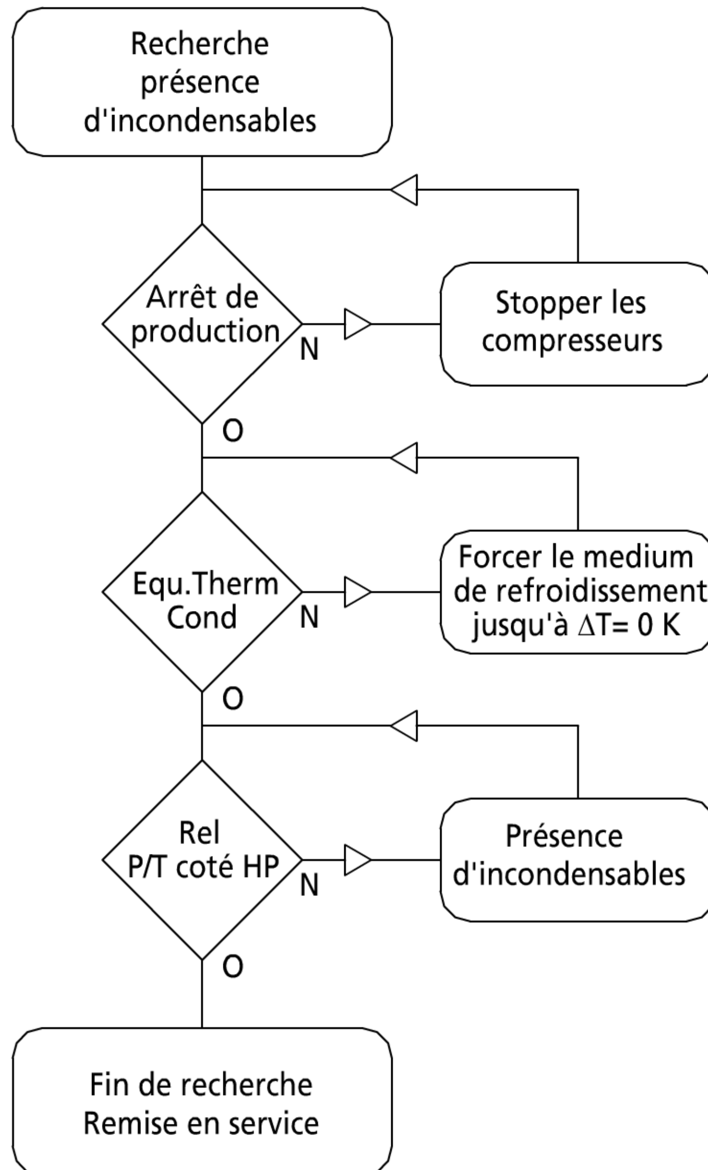


Figure 12.4 Logique de fonctionnement d'un purgeur automatique.

12.5 Automatisation

12.5.1 Théorie

L'automatisation d'un système de détection d'incondensables est envisageable avec un capteur de pression raccordé à la HP, un capteur de température prenant la température du liquide HP (sans sous-refroidissement) et un régulateur permettant la conversion des signaux et leur comparaison.

Le régulateur agira sur un contact commandant par exemple, une électrovanne (figure 12.5).

12.5.2 Pratique

Le système théorique est relativement compliqué à mettre en œuvre et n'est pas garant d'éviter un rejet de fluide frigorigène à l'atmosphère. Dans le cas d'un purgeur automatique, on utilise un système simplifié dont le principe est basé sur l'absence de charge frigorifique (figure 12.6).

Lorsqu'un gaz est en présence dans l'évaporateur du purgeur, la BP du groupe chute de par l'absence de charge frigorifique (pas de chaleur latente). Un pressostat BP détecte la baisse de BP et actionne la vanne de dégazage.

Cette technique repose sur la parfaite étanchéité du circuit frigorifique du groupe de purge.

Certains groupes de purge peuvent proposer des compléments avec des pressostats arrêtant le groupe de purge si la pression du circuit frigorifique est trop faible et/ou possédant des pressostats supplémentaires de sécurité.

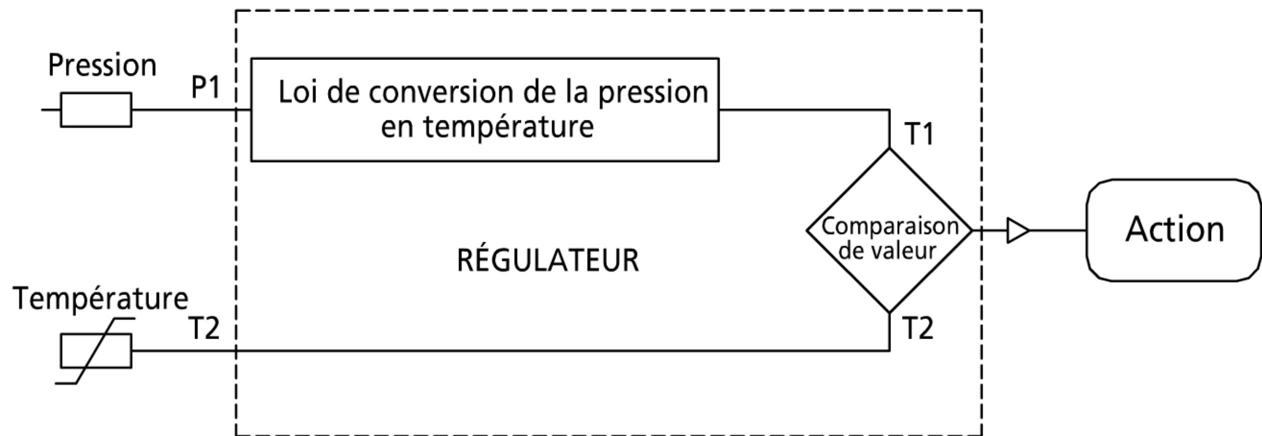


Figure 12.5 Définition des automatismes.

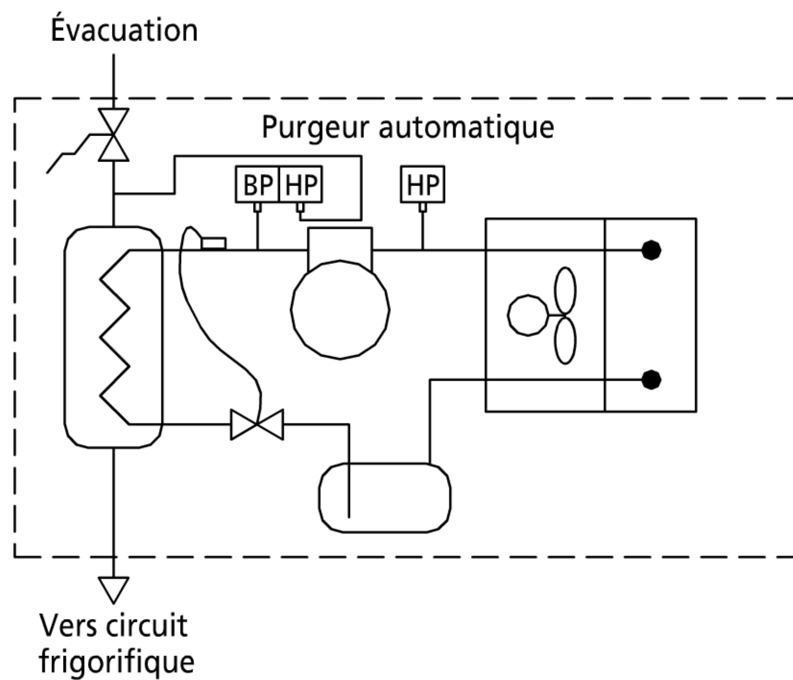


Figure 12.6 Principe pratique de purgeur automatique.

13 Les roof-tops

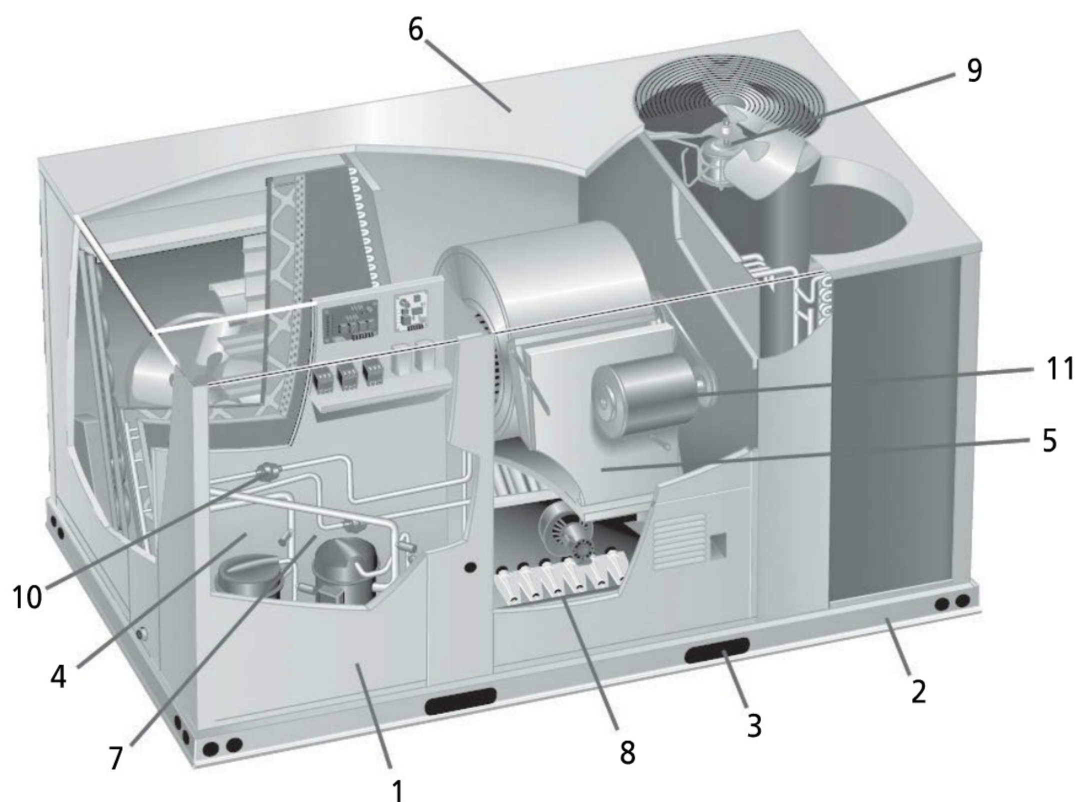
Les roof-tops sont couramment utilisés pour le traitement d'air de magasins de commerce alimentaire et non alimentaire. Ces unités présentent de nombreux avantages tels que :

- solution monobloc (type plug and play),
- fiabilité,
- possibilité de faire de la régulation zone par zone,
- facilement liaisonnable pour une GTC, etc.

13.1 Composition

Les roof-tops sont composés d'une structure métallique et d'un capotage avec des sections amovibles afin de pouvoir accéder aux composants internes (figure 13.1). Ces composants internes peuvent être constitués des éléments suivants :

- Un circuit frigorifique avec ou sans système d'inversion de cycle. Le système frigorifique peut être un assemblage de plusieurs circuits indépendants afin de disposer de plusieurs étages de régulation, d'accroître la fiabilité de l'installation par la redondance de circuit et de faire des dégivrages alternés par circuit.
- Une batterie chaude :
  - soit à eau chaude,
  - soit électrique,
  - soit à gaz.



1. Panneau d’accès externe
2. Châssis
3. Accès d’élinguage
4. Parois interne
5. Ventilateur soufflage
6. Capotage externe
7. Compartiment compresseurs
8. Brûleur à gaz
9. Ventilateur condenseur
10. Réseau frigorifique
11. Moteur

Figure 13.1 Détail d’un roof-top (Doc. LENNOX).

- Un humidificateur.
- Des filtres.
- Un ou des registres avec ou sans registre d'air neuf.
- Un ou plusieurs ventilateurs à réaction ou à action (muni de courroies) pour l'air traité.
- Un système de régulation permettant la gestion :
  - du circuit frigorifique,
  - de la batterie chaude,
  - de l'humidificateur,
  - des registres,
  - de l'encrassement des filtres,
  - de l'alarme incendie.

13.2 Positionnement

L'appareil se positionne en toiture sur une costière (figure 13.2). Cette dernière doit être ventilée dans le cas d'un ERP (Établissement Recevant du Public). La costière repose sur des chevêtres.

Les appareils sont relativement lourds (1 t à 2 t sans option). Il y a lieu par conséquent d'être vigilant sur leur implantation.

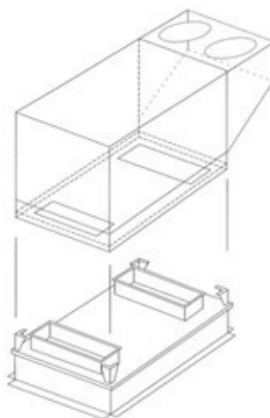


Figure 13.2 Positionnement d'un roof-top sur une costière (Doc. ETT).

13.3 Régulation

La régulation d'un roof-top peut être relativement complexe et intégrer des fonctionnalités de dégivrage, de free-cooling, etc.

L'exemple ci-dessous montre la régulation pour un appareil muni de trois circuits frigorifiques à inversion de cycle et de quatre étages de résistances électriques.

13.3.1 Schéma de principe

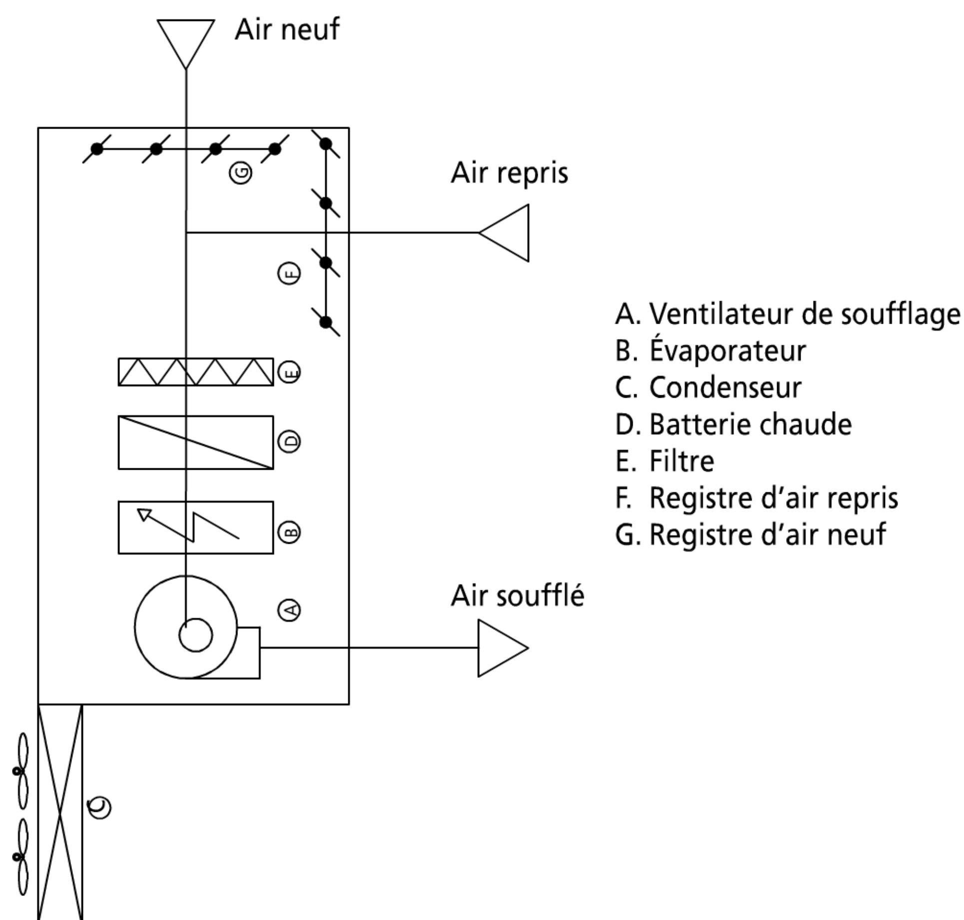
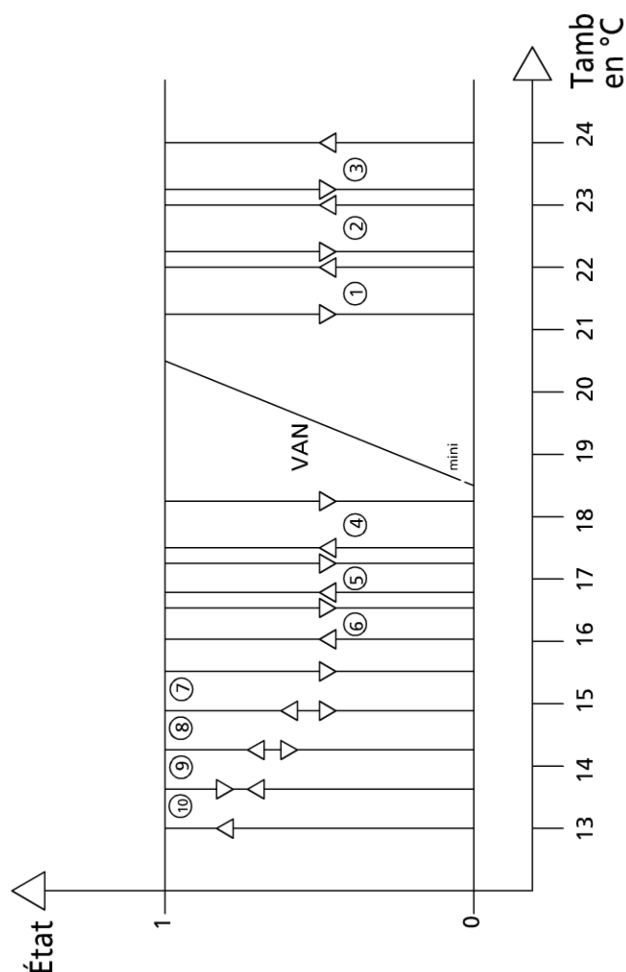


Figure 13.3 Schéma de principe d'un roof-top.

13.3.2 Régulation sur l'air ambiant (ou avec la sonde de température de reprise)



1. État n° 1 Froid
2. État n° 2 Froid
3. État n° 3 Froid
4. État n° 1 Chaud IC [1]
5. État n° 2 Chaud IC
6. État n° 3 Chaud IC
7. État n° 1 Chaud Électricité (Résistances)
8. État n° 2 Chaud Électricité (Résistances)
9. État n° 3 Chaud Électricité (Résistances)
10. État n° 4 Chaud Électricité (Résistances)

VAN - Volet d'air neuf.

1. IC : Inversion de cycle.

Figure 13.4 Logique de régulation d'un roof-top.

14 Les meubles frigorifiques de vente

Les meubles frigorifiques de vente font partie du paysage de la GMS (Grande et Moyenne Surface : supermarchés et hypermarchés) ainsi que de nombreux commerces alimentaires.

L'objet de ce chapitre est d'aborder la régulation frigorifique spécifique à ces équipements de présentation à la vente de produits alimentaires.

Les meubles positifs :

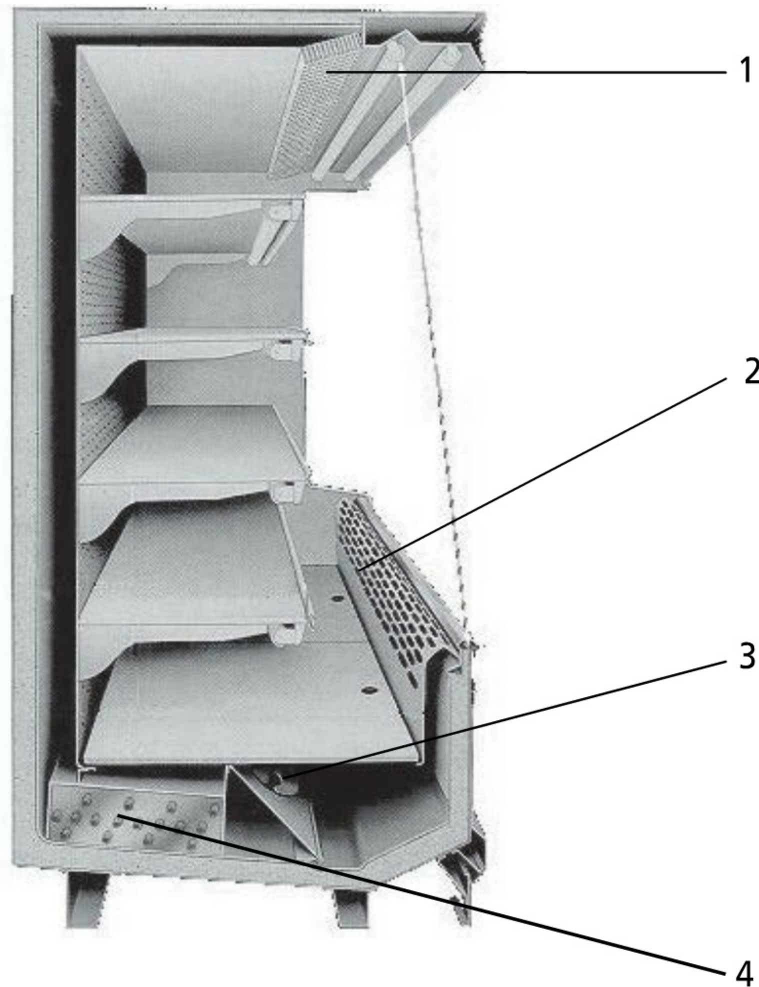
- horizontaux (un seul niveau de produit),
- verticaux (figure 14.1) et semi-verticaux (plusieurs niveaux de produits ouverts ou à portes).

Les meubles négatifs :

- horizontaux type bacs (un seul niveau de produit),
- verticaux (plusieurs niveaux de produits ouverts ou à portes),
- mixte (partie cuve et rayonnages ouverts ou à portes).

La partie frigorifique de ces vitrines est classiquement composée d'un évaporateur (ou batterie) ventilé situé dans la cuve ou à l'arrière du meuble, d'un détendeur thermostatique ou électrique et d'une ou plusieurs vannes électromagnétiques.

Par ailleurs, les meubles frigorifiques peuvent être sur groupe logé ou raccordés à distance sur un groupe ou à une centrale frigorifique. Le meuble peut être à l'unité ou accouplé en linéaire (assemblage de plusieurs meubles).



1 Soufflage principal

2 Reprise

3 Ventilateurs

4 Évaporateur ou batterie

Figure 14.1 Exemple de meuble frigorifique.

La régulation d'un linéaire frigorifique peut être réalisée de plusieurs façons :

- chaque meuble possède son propre régulateur et donc sa propre vanne électromagnétique : régulation « maître/maître »,
- un seul meuble possède le régulateur raccordé à la vanne électromagnétique pour plusieurs meubles : régulation « maître/esclave ».

Les régulateurs employés pour la gestion des meubles intègrent des fonctions tels que :

- gestion de la séquence de dégivrage,
- gestion des rideaux de nuit et de l'éclairage,
- affichage,
- communication au système de supervision,
- pilotage de l'organe de détente.

Pour utiliser ces fonctions, les régulateurs peuvent avoir jusqu'à cinq sondes de température et un capteur de pression avec des ports de communication natifs ou par extension (carte additionnelle).

Pour les meubles esclaves, les acquisitions de température pour la supervision sont réalisables avec des modules d'entrées analogiques déportées.

14.1 Régulation « maître/maître »

La régulation « maître/maître » permet de réguler chaque meuble formant le linéaire à l'instar de meuble indépendant (figure 14.2).

La régulation « maître/maître » permet de gérer au plus juste la demande frigorifique des meubles en fonction de leurs besoins. Toutefois, les régulateurs devront impérativement être liaisonnés entre eux pour, d'une part, la synchronisation des dégivrages et, d'autre part, l'absence de remise en mode réfrigération tant que la séquence de dégivrage n'est pas entièrement finalisée sur l'ensemble des meubles d'un linéaire.

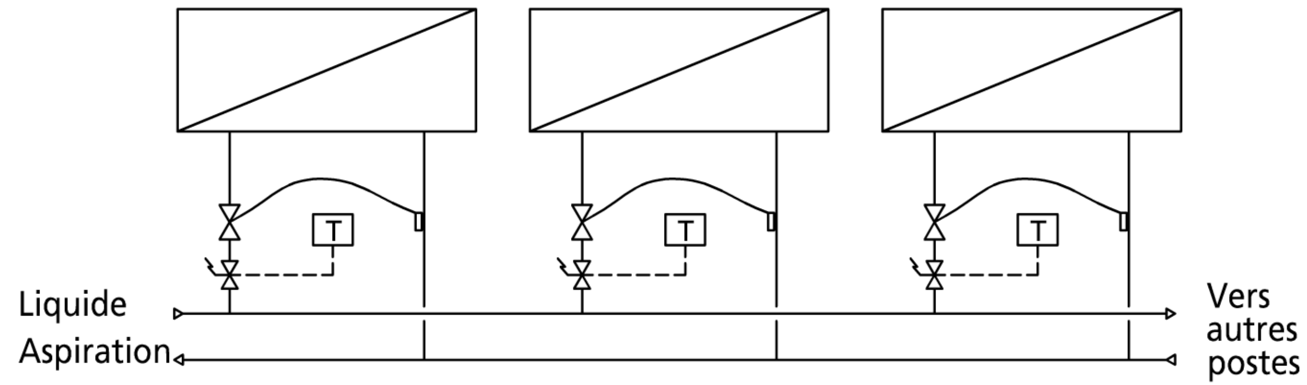


Figure 14.2 Implantation des régulateurs d'une régulation maître/maître.

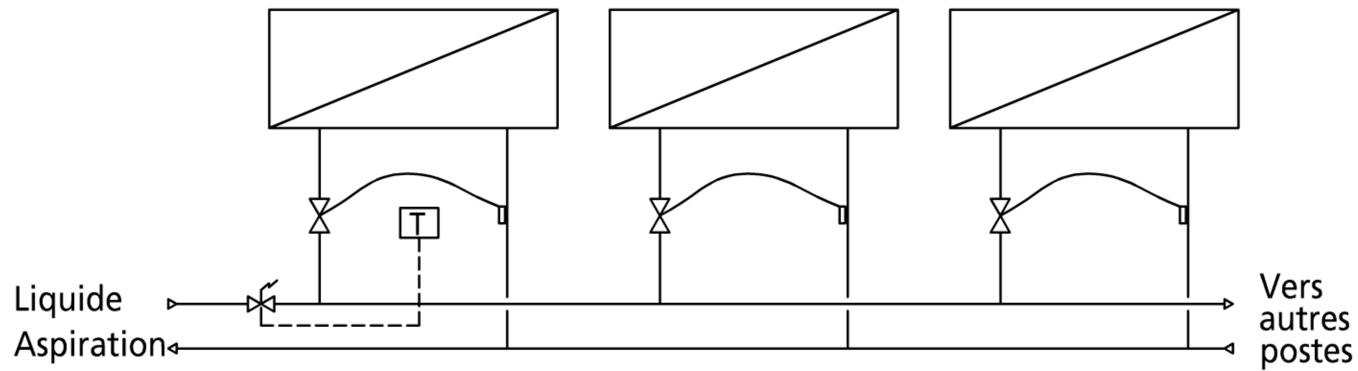


Figure 14.3 Implantation du régulateur d'une régulation maître/esclave.

On peut gérer indépendamment chaque dégivrage de meuble d'un linéaire mais il faut effectuer une séparation physique *via* des joues intermédiaires (parois transparentes entre les meubles). Cette technique n'est pas opportune en froid négatif de par les condensations qu'elle génère.

14.2 Régulation « maître/esclave »

L'intérêt principal de cette régulation réside dans son coût : diminution du nombre de régulateurs et de vannes électromagnétiques (figure 14.3).

La règle généralement admise est la suivante :

- **positif** : un maître pour deux à trois esclaves,
- **négatif** : un maître pour un à deux esclaves.

L'inconvénient majeur de cette régulation réside dans le contrôle *a priori* de la température des meubles esclaves du fait que ces derniers peuvent être l'objet d'apports thermiques sensiblement différents de ceux du maître (présence d'un point chaud local ou d'une porte rapide, etc.) et d'une différence de production frigorifique aux évaporateurs.

Une difficulté réside dans la gestion de la fin du dégivrage et ce, principalement pour les meubles à dégivrage électrique.

Une solution consiste à équiper chaque meuble esclave avec une régulation « esclave » couplée à la régulation « maître » afin d'arrêter la fonction fin de dégivrage sur les esclaves.

Remarque

Le frigoriste repère généralement le meuble maître en positionnant une étiquette (ou un symbole de couleur) à proximité de l'afficheur du meuble maître.

14.3 Points périphériques

14.3.1 Sonde de régulation

La sonde peut être positionnée soit à la reprise, soit au soufflage de l'air. Il est entendu que, dans ce cas, les réglages à opérer au droit des régulateurs sont foncièrement différents.

Le choix de mode de régulation (au soufflage ou à la reprise) incombe au fabricant de meuble, qui a le devoir de donner les moyens de respecter la réglementation concernant la température des produits alimentaires réfrigérés.

14.3.2 Afficheur de température

L'afficheur de température est censé indiquer une température reflétant la température à cœur du produit. Cependant, ce point est plus délicat qu'il n'y paraît.

La sonde doit être positionnée dans le flux d'air ou sur un élément du meuble alors que les produits sont soumis aux contraintes thermiques extérieures. Il s'agit donc d'une indication plus qu'une valeur factuelle de la température du produit.

À ce titre, les fabricants ont développé plusieurs méthodes pour approximer au plus juste cette température :

- position de la sonde sur une étagère,
- affichage de la moyenne entre la sonde de soufflage et de reprise ou algorithme entre ces deux valeurs, etc.

Toutefois, les commentaires précédents se rapportent aux meubles positifs étant entendu que, en ce qui concerne les meubles négatifs, la réglementation spécifie que l'afficheur doit impérativement afficher la température de reprise de l'air.

14.3.3 Dégivrage

Le meuble frigorifique peut dégivrer de plusieurs manières :

- positif : à air, électrique, gaz chaud,
- négatif : électrique, gaz chaud.

À l'instar du mode de régulation, les paramètres de la séquence de dégivrage sont indiqués par le fabricant des meubles (figure 14.4) et doivent être scrupuleusement respectés (sauf dérogation du fabricant).

Une particularité du dégivrage des vitrines négatives porte sur le fonctionnement du rideau d'air qui peut être laissé, selon le type de meuble, en fonctionnement durant la séquence.

Les produits sont donc soumis momentanément à un réchauffement *via* le rideau d'air chauffé. Ce point est toléré dans la limite d'un réchauffement du produit de 3 K, ainsi qu'une limite maximale de température de – 15 °C.

Si l'on conçoit aisément qu'une température d'ambiance trop élevée risque de se répercuter sur la température des produits, il y a lieu de noter qu'une température trop basse peut générer des problèmes de dégivrage pour les meubles positifs à dégivrage par air.

14.3.4 Rideaux d'air

Le meuble frigorifique crée un écran virtuel entre les produits à conserver et l'extérieur *via* le rideau d'air. Ce rideau peut être constitué de plusieurs rideaux d'air.

Dans l'exemple de la figure 14.5, il est présenté un meuble à simple rideau d'air et un autre à double rideaux d'air. Dans ce cas, le deuxième rideau d'air est réalisé avec de l'air ambiant.

Il existe, chez certains constructeurs, des meubles négatifs verticaux ouverts à triples rideaux d'air.

Données frigorifiques – CONDITIONS AMBIANTES MAGASIN

Conditions ambiantes limite en Magasin		CLASSE 3	
Température ambiante	+ 25 °C	Vitesse dair	0,2 m/se g.
Humidité relative	60 %	Éclairage	500 lux

		Système CONVENTIONNEL		Système PARALLÈLE	
		W/mètre	Temp. évap.	W/mètre	Temp. évap.
TEMP. D'APPL. 0/+ 2 °C	Étagères horizontales non éclairées	1 496	– 5,5	1 360	– 5,5
	Avec moins 1 niveau d'étagères	1 571	– 6	1 428	– 6
	Étagères horizontales éclairées	1 608	– 6	1 452	– 6
	Avec moins 1 niveau d'étagère inclinée	1 631	– 6	1 482	– 6
	Avec vitrage en façade	1 376	– 5	1 251	– 5
TEMP. D'APPL. + 2/+ 4 °C	Étagères horizontales non éclairées	1 346	– 3,5	1 224	– 3,5
	Avec moins 1 niveau d'étagères	1 414	– 4	1 285	– 4
	Étagères horizontales éclairées	1 447	– 4	1 316	– 4
	Avec moins 1 niveau d'étagère inclinée	1 468	– 4	1 334	– 4
	Avec vitrage en façade	1 239	– 3	1 126	– 3

Modèle
M82B1
MODULES

Connexions frigorifiques	
LIQUIDE	3/8"
ASPIRATION	5/8"

Température condensation
+ 35 °C

Surchauffe
5 °K

Sous-refroidissement
0 °K

Limitations d'ambiances pour dégivrage naturel *
+ 16 °C/80 % HR

Température d'application	
– 1 + 1 °C	Température produit + 2 °C en magasin
0 + 2 °C	Température produit + 4 °C en magasin
+ 2 + 4 °C	Température produit + 7 °C en magasin

Figure 14.4 Tables de données frigorifiques.

RÉGULATION ET DÉGIVRAGE		Températures d'application 0/+ 2 °C	Températures d'application + 2/+ 4 °C
TEMPÉRATURE INTÉRIEURE	CONSIGNE	+ 2 °C	+ 4 °C
	DIFFÉRENTIEL	1	1
TYPE DE DÉGIVRAGE *		NATUREL	
Nbre DÉGIVRAGES × JOUR		8	8
DURÉE MAXIMUM DÉGIVRAGE		15	15
TEMPÉRATURE FIN DÉGIVRAGE		+ 6 °C	+ 6 °C
DURÉE MINIMUM DÉGIVRAGE		5	5
TEMPS D'ÉGOUTTAGE		0	0
TEMPÉRATURE INTÉRIEURE RÉGULATION JOUR:NUIT	CONSIGNE JOUR	+ 2 °C	+ 4 °C
	CONSIGNE NUIT	+ 3 °C	+ 5 °C
	DIFFÉRENTIEL	1	1

ALARMES

ALARME SUPÉRIEURE	+ 8 °C
ALARME INFÉRIEURE	– 8 °C
RETARD ALARME	1,1 h

SÉQUENCE DU DÉGIVRAGE

DÉGIVRAGE NATUREL

Pendant cette période, l'alimentation de fluide réfrigérant à l'évaporateur est coupée.

DÉGIVRAGE ÉLECTRIQUE

Pendant cette période, l'alimentation de fluide réfrigérant à l'évaporateur est coupée et les résistances de dégivrage entrent en fonctionnement.

FIN DE DÉGIVRAGE

PAR TEMPS :
Une fois le temps programmmé écoulé le meuble retourne au fonctionnement initial.

PAR TEMPÉRATURE (PRESSION) :
Une fois la température programmée atteinte, le meuble retourne au fonctionnement initial.

TEMPS DE SÉCURITÉ

Une fois le temps de sécurité écoulé si le dégivrage n'est pas encore terminé, le meuble retourne au fonctionnement initial.

RÉGULATIONS BASÉES SUR DES ESSAIS EN LABORATOIRE

S'IL Y A LIEU, MODIFIER LA RÉGULATION
DU THERMOSTAT
FIN DE DÉGIVRAGE ET/OU
DU PROGRAMMATEUR DE DÉGIVRAGE
AFIN DE GARANTIR L'ÉLIMINATION TOTALE
DU GIVRE ET L'ÉVACUATION D'EAU

Climate Control Sector KOXKA An IR Ingersoll-Rand business

Figure 14.4 Tables de données frigorifiques (*suite*).

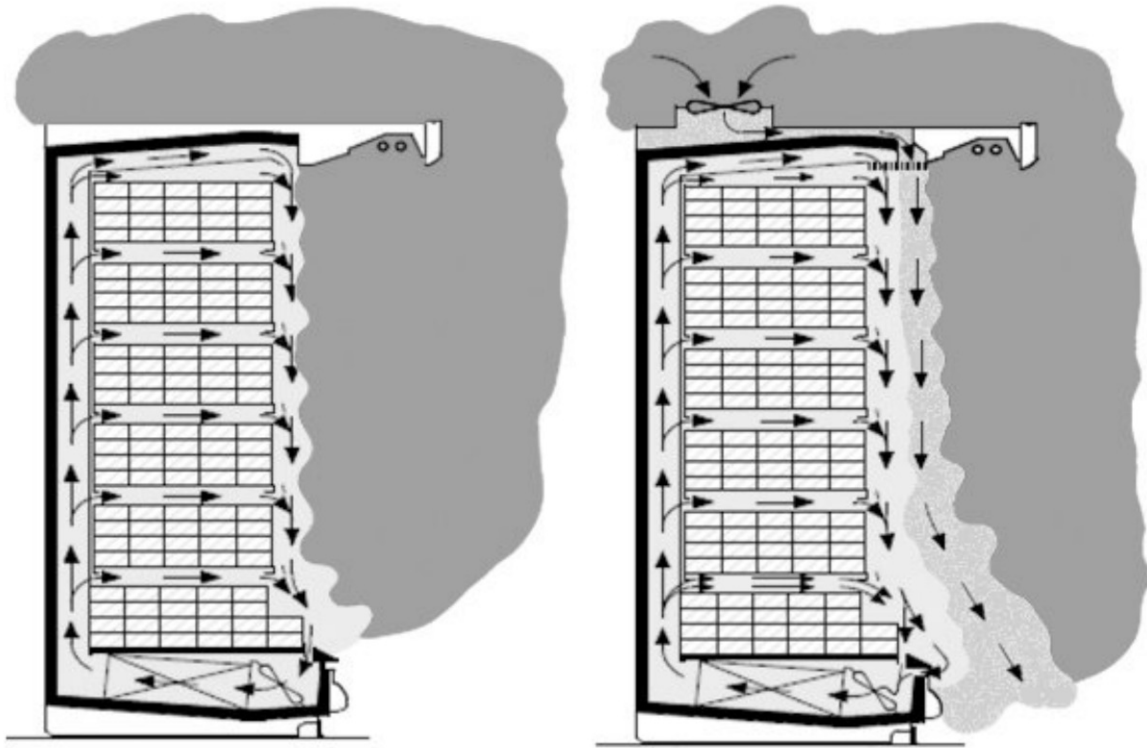


Figure 14.5 – Rideaux d'air de meubles frigorifiques (Doc. COSTAN – EPTA).

Remarque

Lors de l'utilisation de rideaux de nuit, seul le rideau réfrigéré sera maintenu en fonctionnement afin de limiter la condensation sur les rideaux de nuit et la consommation électriques des ventilateurs inutiles.

On observe également, dans ce cas, une modification du point de consigne afin de bénéficier des économies d'énergie et de réduire les prises en glace.

15 Automatisme

Les automates programmables sont aujourd'hui couramment utilisés dans l'industrie frigorifique. Ils offrent de nombreuses possibilités grâce à la programmation de fonctions très élaborées. Les modifications sont aisément réalisées par programmation et l'on peut obtenir des fonctionnements très différents dans un même programme prenant en compte des impératifs de process industriel.

15.1 Architecture

Un automate programmable est constitué des éléments suivants (figure 15.1) :

- bornes d'alimentation,
- bornes de chien de garde (CDG). Dans certains automates, il peut s'agir de sorties paramétrables,
- entrées logiques et analogiques,
- sorties logiques et analogiques,
- processeur,
- mémoire de travail,
- mémoire de sauvegarde,
- pile de sauvegarde,
- ports de communication pour connecter :
  - des périphériques (imprimante, pupitre, etc.),

- ▹ un bus de communication,
- ▹ un modem.

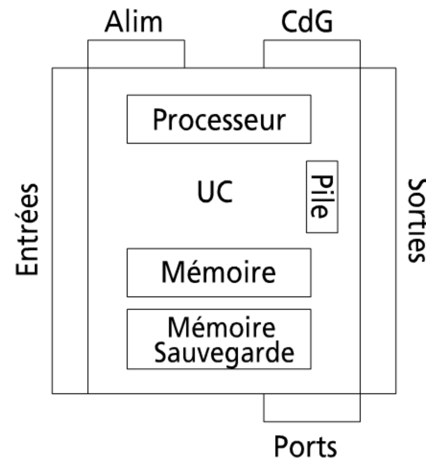


Figure 15.1 Principe d'un automate programmable.

Les entrées logiques sont des entrées tension du type Tout Ou Rien. Elles sont utilisées pour donner des informations de fonctionnement ou d'arrêt, de défaut ou d'absence de défaut, etc.

Les entrées analogiques servent à donner des informations de mesure (température, pression, etc.).

Les sorties Tout Ou Rien servent à commander des actions (exemple : enclenchement de compresseur, arrêt de machine, etc.).

Les sorties analogiques ont pour fonction de piloter des éléments modulants du type vanne, variateur, etc.

L'automate peut comporter de manière native ou non des entrées et sorties et peut être complété de module d'extension ou des entrées/sorties déportées liaisonnées par un bus de communication.

Le processeur est l'élément principal qui va exécuter les tâches de l'automate en analysant les entrées puis le programme et conduire les sorties selon les résultats des calculs qui ont été effectués.

Le processeur est plus au moins puissant, c'est-à-dire qu'il est notamment plus au moins rapide dans l'exécution de ces tâches.

La lecture du programme du début à la fin s'appelle un cycle. Le temps d'un cycle est de l'ordre de la milliseconde.

La zone mémoire contient le programme et les éléments stockés comme les valeurs analogiques. Cette zone peut être une seule mémoire partagée ou plusieurs zones mémoires.

Il existe plusieurs types de mémoires pour les automates programmables. Les mémoires sont soit permanentes, soit volatiles.

La perte de l'alimentation et de la pile aura un effet différent selon le type de mémoire employé.

La mémoire volatile sera entièrement perdue alors que l'autre non. Toutefois, dans les deux cas, les valeurs instantanées analogiques seront perdues.

Le choix du type de mémoire influe fortement sur la capacité de stockage, la rapidité d'action et le prix de l'élément. Par ailleurs, compte tenu que la mémoire contient le programme, il est important que son contenu soit sécurisé. Une solution de sécurisation consiste à utiliser une mémoire externe contrôlant en permanence la cohérence entre la mémoire principale et la mémoire de sauvegarde. En cas d'incohérence, il y a un chargement automatique de la mémoire de sauvegarde vers la mémoire principale.

En fonction du type d'automate, la façon, dont le programme est lu et exécuté, peut être différente. Certains automates prennent l'état des entrées et sorties, calculent celles-ci dans le programme et rafraîchissent l'état des sorties selon ces calculs. D'autres automates lisent et exécutent le programme en temps réel.

La manière dont on programmera l'automate devra impérativement prendre en compte son type de fonctionnement afin d'éviter des phénomènes transitoires générés sur un temps de cycle.

15.2 Automate programmable et automate de régulation

On rencontre fréquemment dans l'industrie des automates programmables et des automates de régulation (figure 15.2). *A priori*, il s'agit d'appareils donnant un fonctionnement similaire. La différence porte en fait sur la programmation.

L'automate programmable n'est pas dédié à une utilisation spécifique, ce qui permet ainsi un grand nombre de possibilités, cependant un travail de développement est nécessaire pour l'écriture du programme.

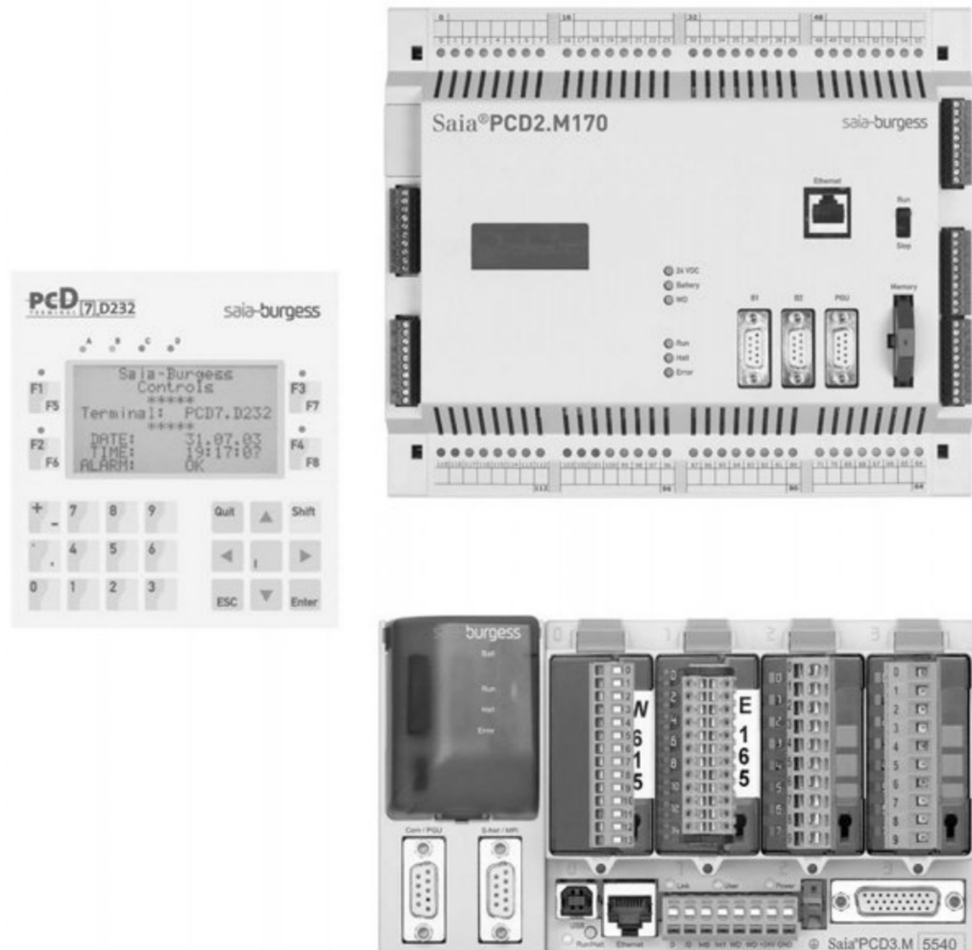


Figure 15.2 Exemples d'automates programmables et d'automates de régulation (Doc. SAIA-BURGESS).

Le régulateur, quant à lui, est un appareil du type « Plug & Play » ou l'ensemble des fonctions est déjà défini. Le travail de programmation se limite à un travail de paramétrage de ses fonctions pour établir la fonctionnalité de l'appareil.

Si les fonctions sont déjà définies, celles-ci sont très ciblées à la finalité du matériel. Il est ainsi difficile d'utiliser un automate de régulation dans un autre métier que celui pour lequel il a été développé.

On trouve dans l'industrie des automates portant le nom de nano-automate. Comme son nom l'indique, il s'agit de petits automates comportant peu d'entrées/sorties avec une faible capacité mémoire.

La gamme d'automates programmables comprend de nombreux modèles plus ou moins importants en terme d'entrées/sorties, mémoire et performance afin de répondre à toutes les applications avec le matériel le plus adapté.

15.3 Les langages de programmation

Les langages permettent d'élaborer le programme de l'automate. Ces langages sont l'interface entre l'homme et la machine et peuvent être du type :

- Grafcet,
- schéma contact,
- logigramme,
- code.

15.3.1 Grafcet

Le Grafcet (Graphe fonctionnel de commande étapes/transitions) est un langage d'automaticien qui, au travers de succession d'étapes intermédiaires, part d'un point de départ pour aller à un point de fin (figure 15.3).

Ce type de langage est plus approprié à des process d'usine du type embouteillage ou assemblage où l'on répète en permanence la même séquence d'action. En réfrigération, le point de départ est le démarrage de la machine et le point de fin est l'arrêt de la machine. Les étapes intermédiaires sont limitées à la sécurité ou l'action de réduction de puissance.

15.3.2 Schéma contact

Le schéma contact s'apparente très fortement au schéma électrique. Ce type de langage a été développé pour faciliter la programmation par les personnes de formation électrique (figure 15.4).

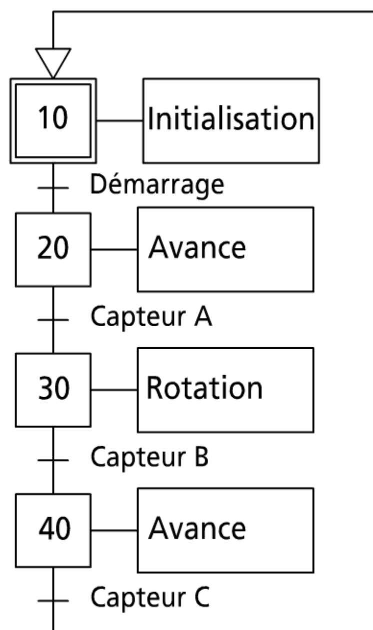


Figure 15.3 Exemple de programme en Grafcet.

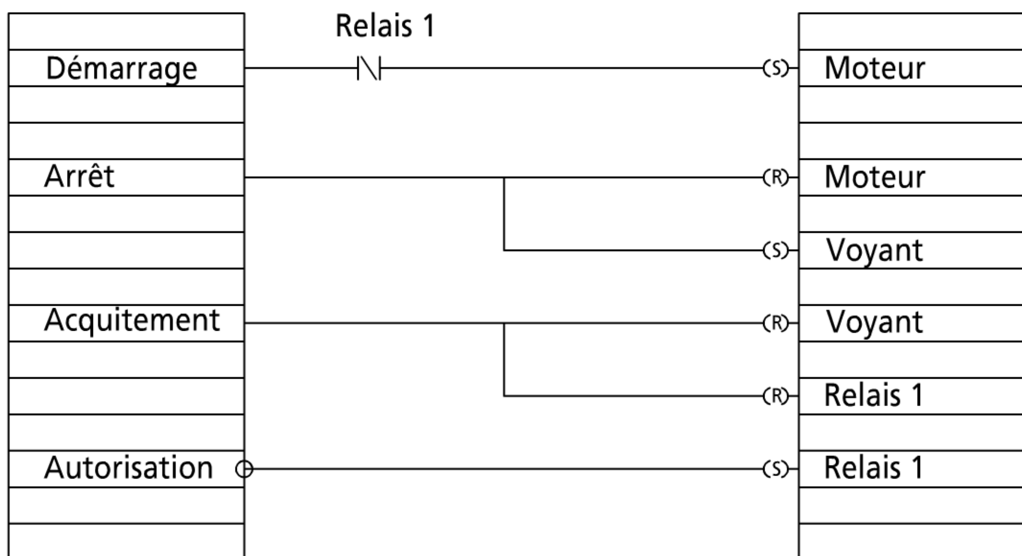


Figure 15.4 Exemple de programme en schéma contact.

15.3.3 Logigramme

Le logigramme est un langage constitué de symbole prêt à l'emploi où l'on utilise des fonctions logiques telles que : et, ou, non, etc., mais sous forme de boîte (figure 15.5).

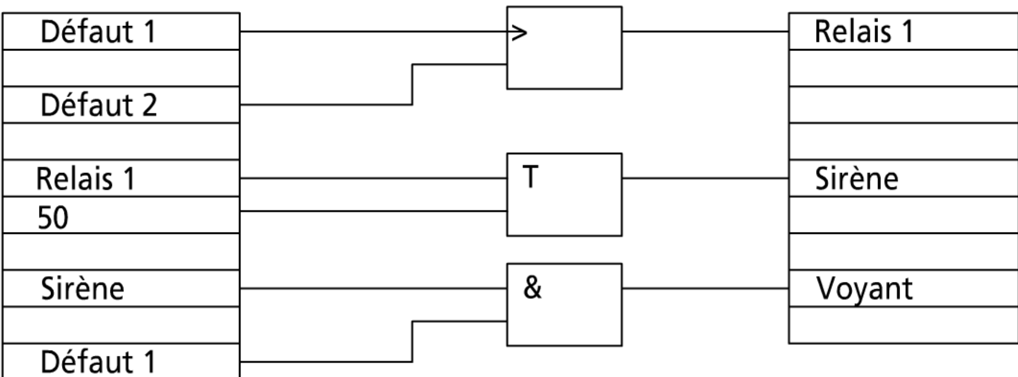


Figure 15.5 Exemple de programme en langage logique.

Les langages ci-dessus peuvent être complétés de boîtes élaborées contenant des fonctions complexes.

15.3.4 Code

Le langage en code se rapproche fortement du langage informatique. Il s'agit du langage le plus primaire qui est à l'origine et en sous-couche des autres types de langages (tableau 15.1).

Le programme absorbe de la mémoire et, par conséquent, plus le programme est volumineux, plus il faut de la mémoire. Certains automates donnent la possibilité de remplacer la taille de la mémoire selon les besoins, et d'autres permettent la mise en place de mémoire additionnelle.

Les programmes se développent à l'aide d'une interface informatique. L'interface sert aussi à transférer le programme dans l'automate.

La technique de compactage du programme pour le chargement diffère fondamentalement d'un automate à l'autre. Certains logiciels de chargement compilent le programme avant le chargement rendant ainsi le programme à son strict essentiel alors que d'autres gardent le maximum d'éléments tels que la liste des symboles (nom, etc.). Dans ce cas, la différence essentielle

réside dans l'accès en « run » dans l'écriture du programme qui évite ainsi le rechargement du programme pour une modification mineure.

Tableau 15.1 Exemple de programme en code.

PROG 0 OilPumpProg1	Départ Programme 0
sth Inter_Marche	Si enclenchement de l'interrupteur Marche
orh Fonct_auto	Ou si enclenchement de la fonction automatique
out Relais1	Enclenchement du relais automaticité 1
sth Relais1	Si enclenchement du relais automaticité 1
anh Niveau	Et si enclenchement du niveau
anl ATU	Et si pas enclenchement de l'arrêt d'urgence
out Pompe	Alors enclenchement de la pompe
PROG 0 End	Fin Programme 0

15.4 Les ressources internes

L'automate doit utiliser des ressources pour faire fonctionner le programme. Ces ressources sont des « bits » pour exprimer les entrées (0 ou 1) et des « rregistres » pour stocker les valeurs analogiques.

Le programme nécessite pour son propre fonctionnement des bits internes et des mots. Les valeurs stockées dans les registres dépendent du nombre de bits servant à stocker les valeurs analogiques (mots). Celles-ci peuvent être sur 8 bits, 16 bits, 32 bits, etc.

Le traitement des mots est important pour connaître notamment la définition des valeurs après virgules et le traitement admissible de ces valeurs durant les divisions ou les multiplications. Selon le travail de leurs mots, les automates permettent de réaliser un grand nombre de calculs mathématiques tels que :

- les additions,
- les soustractions,
- les divisions,
- les multiplications,
- les logarithmiques,
- les exponentielles, etc.

À l'aide de ces calculs, l'automate réalise les fonctions suivantes :

- les temporisateurs : à l'ouverture, à la coupure, avec commande, avec remise à zéro, etc.,
- les compteurs,
- les monostables,
- les fonctions logiques et, ou, non, oui, and, nor, etc.

Par ailleurs, des fonctions spécialisées sont apparues pour s'adapter aux métiers des utilisateurs :

- fonction P, PI, PID,
- gestion de centrale,
- module de communication, etc.

Ces dernières fonctions se présentent sous la forme de module où seules les valeurs de paramétrage sont accessibles. La puissance de l'automate est liée aux nombres de mots, de bits, de temporisateurs et de compteurs disponibles pour l'écriture du programme.

Remarque

Avant de commencer la rédaction, il est fortement conseillé de bien prendre en considération les ressources internes de l'automate face au programme à effectuer sous peine d'avoir des problèmes de fin d'écriture.

15.5 Les pupitres opérateurs

Les pupitres opérateurs servent d'interface entre l'opérateur et la machine. L'opérateur peut à l'aide du pupitre changer facilement une valeur dans un registre servant par exemple au réglage d'une consigne.

Les pupitres doivent être programmés pour agir sur les mots ou bits concernés. Certains pupitres sont dits « intelligents » et nécessitent d'être téléchargés par un programme propre. Il existe aussi des pupitres dits « non intelligents » et qui ne nécessitent pas de programme. Dans ce dernier cas, c'est le programme principal de l'automate qui contient le programme lié au pupitre.

Certains pupitres sont extrêmement simples, servant juste d'afficheurs, d'autres sont très élaborés allant jusqu'à la console tactile intégrant des graphiques de couleur (figure 15.6).



Figure 15.6 Exemples de pupitres opérateurs (Doc. SCHNEIDER ELECTRIC).

15.6 Chien de garde et précautions

L'automate programmable est en fait un calculateur basculant des bits en fonction d'états ou de valeurs d'entrée/sortie et d'un programme. Si l'automate a un problème avec son calculateur, le résultat peut être catastrophique voire très dangereux.

Par ailleurs, en cas de chute de tension, l'automate doit s'arrêter rapidement avant d'être en manque de tension et d'engendrer de faux résultats de calcul.

Pour ces raisons, l'automate s'autocontrôle en permanence et ouvre un contact appelé chien de garde (CDG) en cas de défaut automate.

Pour certains automates, il s'agit de contact dédié, pour d'autres, on peut paramétrer parmi les sorties, le contact faisant office de chien de garde. Le chien de garde doit asservir un relais autorisant ou non les sorties. Si le chien de garde tombe, les sorties devront impérativement s'ouvrir.

Remarque

Attention, il s'agit d'un câblage physique à opérer.

15.7 Programme et structure

Le programme de l'automate peut être relativement conséquent aussi il y a lieu de se poser les questions suivantes.

Quel type de langage utiliser ?

Le langage choisi a une incidence directe sur le temps de travail de développement. À titre d'exemple, lorsqu'il faut charger un grand nombre de registres avec des constantes, l'utilisation du code peut s'avérer beaucoup plus facile. À l'opposé si le programme est destiné à être lu par des tiers électriciens non expérimentés à l'automatisme, le langage schéma contact sera un choix plus judicieux.

Quelle structure employer ?

La structure est essentielle dans le développement d'un programme d'automatisme. Cette structure facilitera la mise au point et permettra la réutilisation aisée de séquence dans d'autres programmes par des copier/coller appropriés. Le logigramme de la figure 15.7 propose une structure de programme.

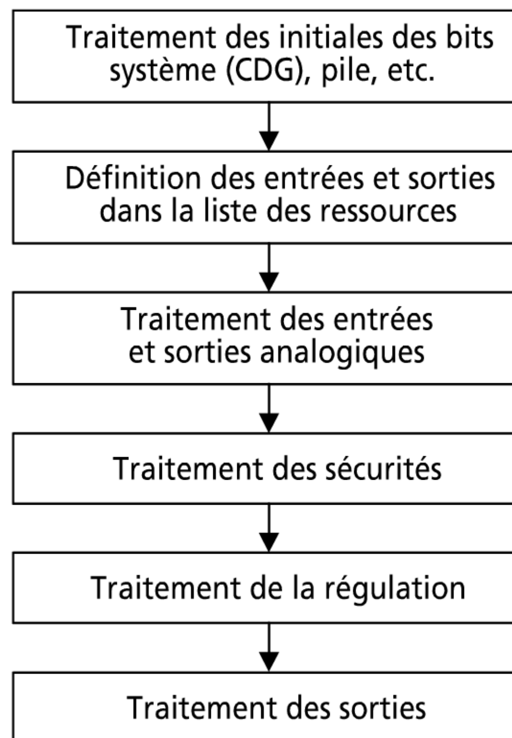


Figure 15.7 Structure d'un programme.

15.8 Définition des cartes entrées/sorties

Les fabricants offrent différents types de cartes d'entrées et sorties en fonction de la précision souhaitée. On trouve des cartes 8 bits, 10 bits, 12 bits, etc. Ces cartes indiquent le nombre de points affectés à la plage de l'entrée ou de la sortie correspondante. Il est donc essentiel de vérifier la précision désirée ou risquer d'être dans l'impossibilité d'obtenir la grandeur souhaitée.

À titre d'exemple, un capteur – 50/+ 100 °C affecté à une carte 8 bits (256 points) donne un rapport minimum de 0,58 K/point et ne permet donc pas de descendre en dessous de cette précision.

16 Supervision

Les systèmes de supervision sont aujourd'hui couramment utilisés. Ils sont une interface essentielle entre l'homme et la machine.

16.1 Architecture

Un système de supervision est constitué des éléments suivants (figure 16.1) :

- un PC standard ou une console dédiée,
- une connexion à un bus,
- un modem,
- une imprimante,
- un ensemble de régulateurs et/ou modules communicants.

16.2 Fonctionnalités

Un système de supervision peut offrir les fonctionnalités suivantes :

- gestion des alarmes : archivage des données entrant et sortant ; affichage des alarmes en cours ; gestion des acquittements suivant les mots de passe ; tri des alarmes par occurrences,
- archivage des données et traçage de courbe,
- synoptique des installations avec états dynamiques de fonctionnement des matériels,

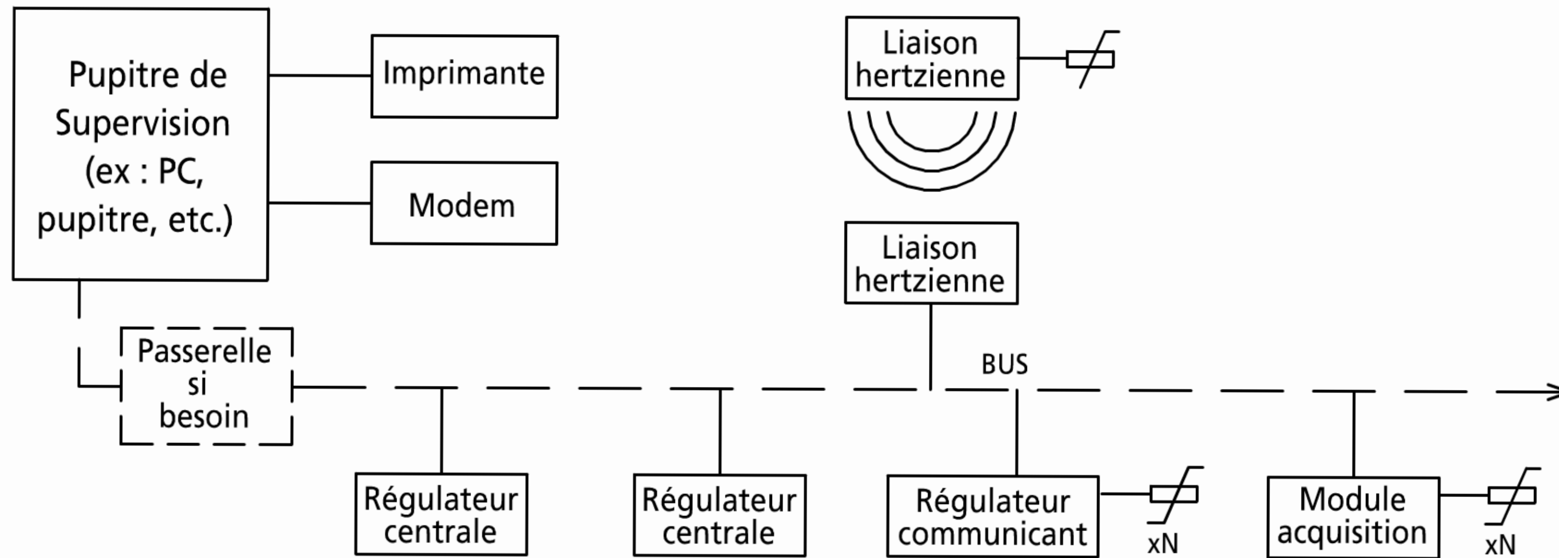


Figure 16.1 Architecture d'un réseau de supervision.

- paramétrage aisé de l'ensemble des points de consigne,
- gestion des mots de passe hiérarchisés.

L'ensemble de ces éléments est souvent donné sous une interface graphique conviviale.

Un système de supervision doit pouvoir être utilisable aussi bien par des intervenants non spécialisés que des techniciens chevronnés.

C'est la gestion d'accès qui doit être conçue pour éviter toute fausse manœuvre par des intervenants non spécialisés.

Les logiciels de supervision sont généralement développés sous forme de module (module de communication, module d'alarme, module de courbe…). Ce développement permet des ajouts aisés pour les mises à jour de ces softs.

16.3 Logiciels

À l'instar des automates, on trouve dans le commerce des logiciels de supervision type « Plug & Play » qui sont par conséquent prêts à l'emploi et d'autres logiciels qui nécessitent un développement avant utilisation. Pour ce type de logiciel, le développement s'effectue avec des langages plus ou moins spécifiques dont un grand nombre est dérivé du Visual Basic.

Le paramétrage des adresses des mots et des bits est un point important de la supervision. Cette étape est plus au moins facile selon les systèmes.

Dans le cas d'un système dédié, il suffit de déclarer les adresses (soit physiquement, soit électroniquement) entre les éléments connectés sur le bus et de paramétrer la supervision pour définir le nombre d'éléments connectés.

On peut ainsi envoyer, à partir de la supervision et pour chaque élément, l'ensemble du paramétrage de l'élément considéré. Quelques systèmes de supervision dédiés :

- DANFOSS,
- CAREL (figure 16.2),
- DIXELL, etc.

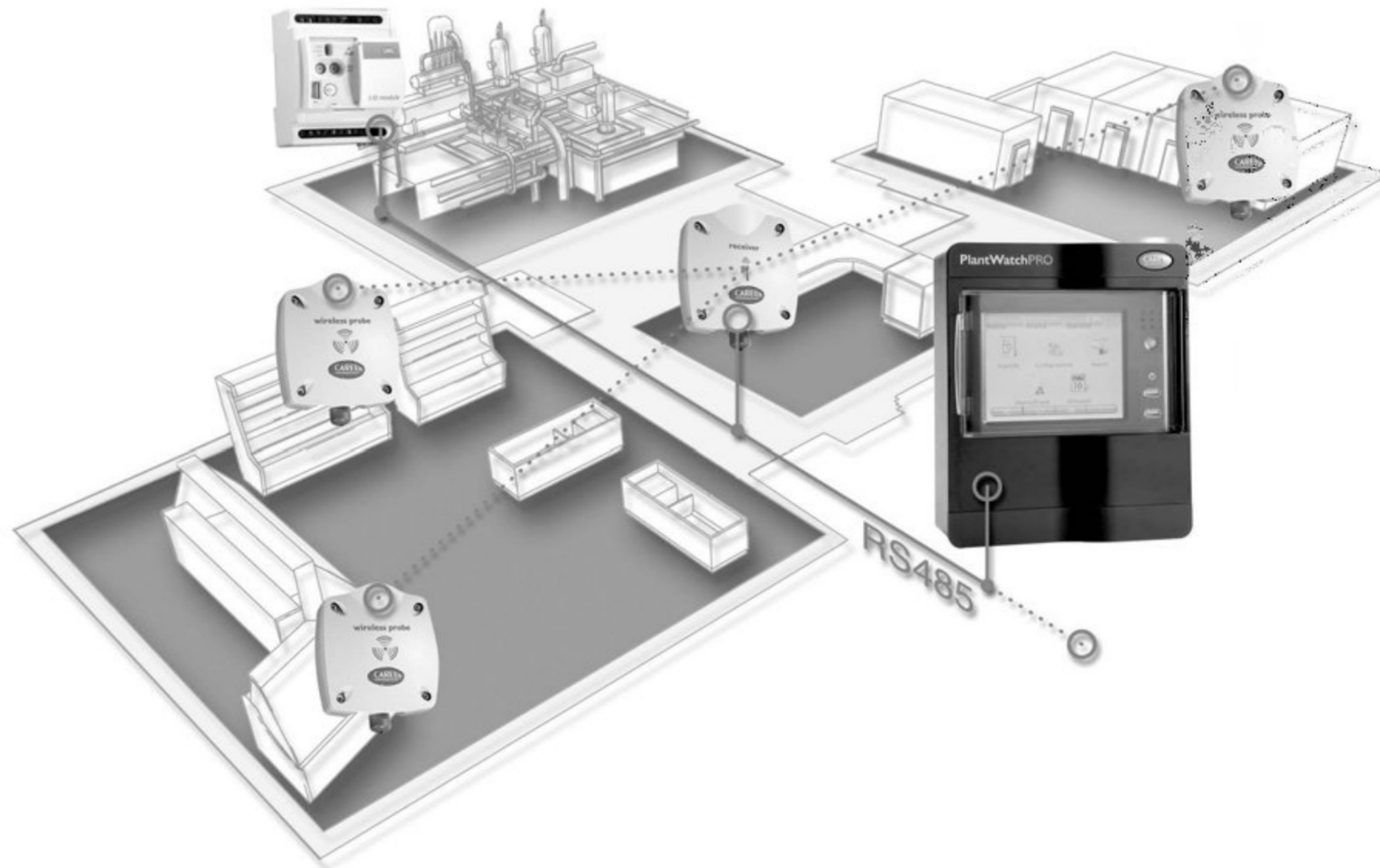


Figure 16.2 Exemple d'installation de supervision (Doc. CAREL).

Pour les systèmes non dédiés du type PC, ceux-ci se connectent à un automate. La communication PC/automate est établie à l'aide d'un logiciel de communication qui peut être directement intégré dans le soft de supervision ou complètement séparé. Ces logiciels utilisent des connexions du type « serveur sous OPC » (*Object Linking and Embedding for Process Control*).

16.4 Communication

16.4.1 Bus

Le bus est généralement constitué de deux fils torsadés blindés en fonction du type de réseau. Si l'on veut garantir la fiabilité de communication, la mise en œuvre du bus doit faire l'objet d'une attention particulière. Il convient de ne pas employer n'importe quels fils et de bien respecter les contraintes d'installation pour obtenir une qualité du signal optimum.

16.4.2 Réseau

On emploie fréquemment le réseau en RS485. La vitesse de communication varie selon le matériel. Ces vitesses sont généralement de 38 400, 19 200, 9 600, 4 800, 1 200 bauds. Il s'agit de réseau half/duplex ou un seul élément communique à la fois.

La qualité du bus joue directement sur la vitesse maximale autorisée par celui-ci. Plus le bus est perturbé et plus la vitesse doit être faible.

La distance maximale du bus est très variable selon la vitesse de communication. Cette distance peut évoluer jusqu'à 1 000 m bien que l'on puisse augmenter la longueur maximale en ajoutant des répétiteurs de signal. On passe d'un type de signal à un autre grâce à des convertisseurs de signaux.

Le réseau RS485 peut se convertir en d'autres réseaux (figure 16.3) :

- RS232 : il s'agit d'une liaison du type bureautique. La distance maximale est relativement faible (maxi : 10 m),
- RS422 : le réseau RS422 s'apparente au RS485. À l'instar du RS485, la distance maximale est de l'ordre de 1 000 m.

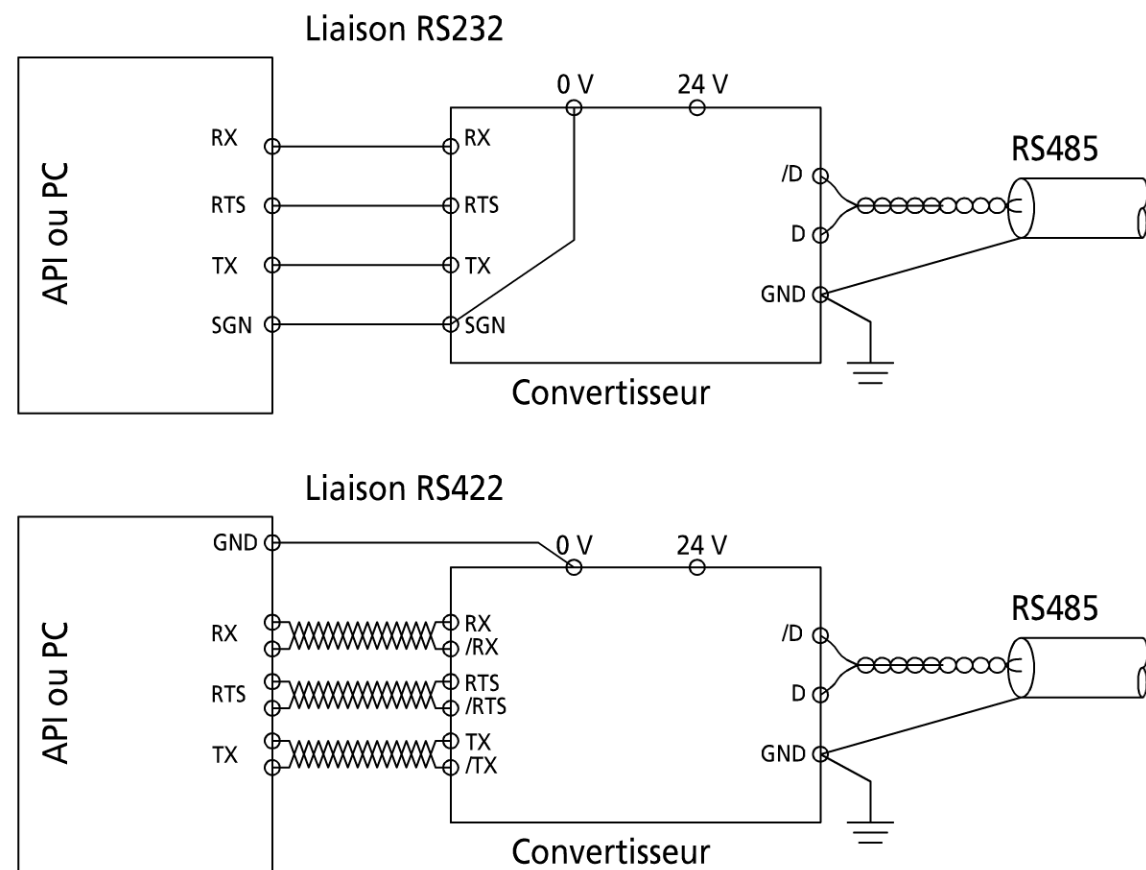


Figure 16.3 Conversion de réseaux RS485 en RS232 et RS422.

16.4.3 Protocole de terrain ouvert

Modbus maître/esclave

Il s'agit d'un protocole très répandu qui est souvent utilisé pour la récupération de données entre des matériels *a priori* pas compatible. Le paramétrage du Modbus nécessite de connaître les éléments tels que : vitesse de communication, nombre de bits, parité, bits de stop, mapping, etc. Le nombre des données est limité.

Profibus[1] DP[2], Profibus FMS[3], Profibus PA[4]

Parmi ces variantes de protocole, celui le plus employé est le profibus DP en mono maître ou multi-maître avec des esclaves (maximum 125 esclaves).

Dans le cas de multi-maître, le Profibus DP ne gère pas la communication entre maître et il faut alors passer au Profibus FMS.

Le Profibus PA quant à lui est réservé à des applications spécifiques.

LonWorks

C'est un protocole permettant à n'importe quel appareil adhérant à LonMark de pouvoir s'interconnecter. Chaque appareil comporte un numéro unique qui le distingue parmi les autres, il peut alors être défini sur le réseau grâce à ce numéro.

Si l'idée semble séduisante, la mise en œuvre peut être relativement lourde.

16.4.4 Protocole de terrain fermé

Il existe de nombreux protocole de terrain fermé comme :

- Danbus,
- N2,
- Unitelway, etc.

1 *PROcess Field BUS.*

2 *Decentralized Peripherals.*

3 *Fieldbus Message Specification.*

4 *Process Automation.*

16.4.5 Autre protocole : Ethernet TCP/IP

Ce type de réseau interconnecte localement de nombreux postes possédant une adresse IP et permet l'accès à Internet. La connexion s'effectue par un connecteur RJ45 (câble informatique) et autorise des vitesses de communication très élevées.

Une passerelle de bus de terrain, un régulateur ou un automate peut s'intégrer dans l'architecture informatique du bâtiment et être consultable *via* intranet ou Internet (figure 16.4).

16.5 Alarmes et communication à distance

L'intérêt de la communication à distance est d'effectuer une surveillance éloignée du fonctionnement du matériel ou de réaliser un prédiagnostic avant intervention ou encore une maintenance assistée sans déplacement.

Les superviseurs dédiés peuvent nécessiter un logiciel de communication spécifique alors que pour sur les superviseurs standard on utilise des softs classiques du type pcAnywhere de chez SYMANTEC.

Dans ces cas, la communication s'effectue par modem *via* une ligne LS (liaison spécialisée) ou RTC (réseau télécommuté) (figure 16.5).

Les derniers développements de logiciels de supervision offrent aujourd'hui une communication directe par Internet *via* le browser du système d'exploitation. Cette communication à distance présente un progrès car elle supprime les coûts de communication, ce qui est particulièrement intéressant lorsque la distance est conséquente.

Toutefois, bien que la liaison Internet permette l'envoi d'alarmes par e-mail, ce système ne peut pas garantir le temps de transmission du message, ce qui rend obligatoire la mise en place d'un système de transmission de défaut en parallèle (fax, SMS, report d'alarme, etc.).

En résumé, lors du choix d'un système de supervision, il convient de s'interroger sur les points suivants :

- Quel élément transmet l'alarme et comment ?
- De quelle manière peut-on avoir accès à distance à la supervision ?

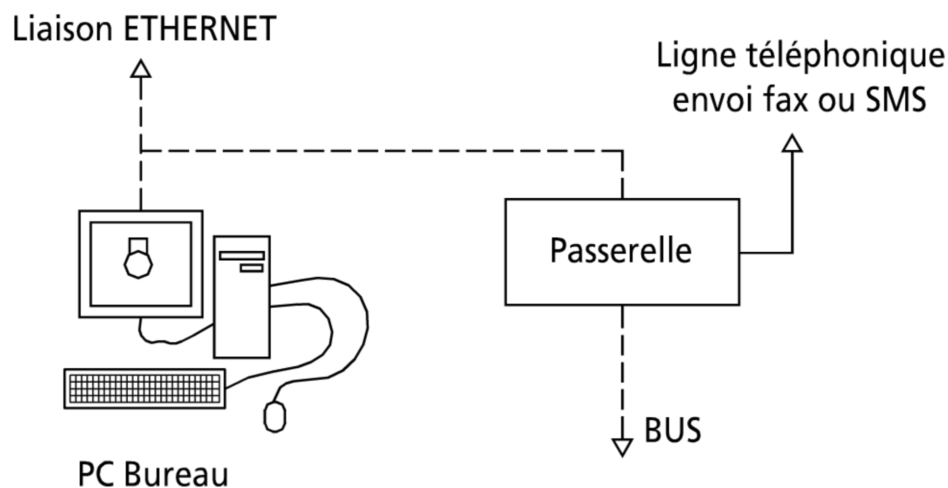


Figure 16.4 Architecture en réseau Ethernet.

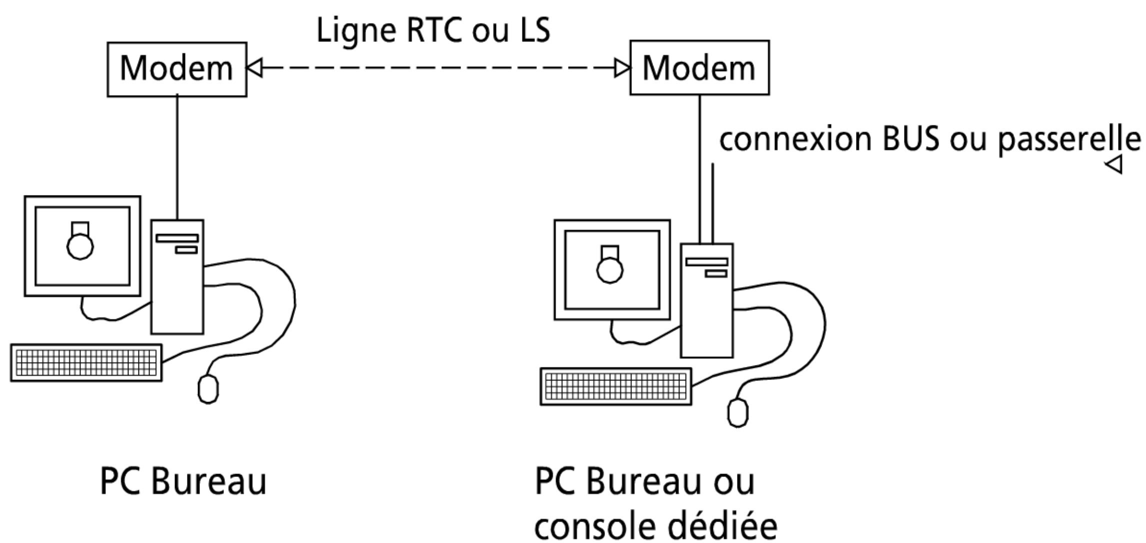


Figure 16.5 Principe d'un raccordement pour une liaison à distance.

Les systèmes présents actuellement sur le marché ont des réponses différentes à ces questions. La gestion d'alarme peut s'effectuer par l'envoi soit de fax et/ou SMS, soit d'une alarme à un poste de gardiennage local ou à distance.

La télé action peut être réalisée *via* Internet, Ethernet ou une ligne téléphonique.

Notons que, dans ce dernier cas, les vitesses de communication rendent difficile l'accès aux interfaces graphiques des superviseurs.

17 Cas d'études

Les exemples constituant ce chapitre ont pour objet de présenter des applications pratiques des différentes techniques de régulation utilisées dans le génie frigorifique et climatique.

17.1 Exemple 1

Une ancienne installation frigorifique au R22 de 200 kW frigorifique est équipée d'une récupération de chaleur de 40 kW pour chauffer l'eau chaude sanitaire (voir schéma fluidique en figure 17.1).

a) Pour chaque repère (A, B et C), on doit définir :

- **a.1)** le type de vanne (amont, aval, etc.),
- **a.2)** le rôle de la vanne.

b) La production d'eau chaude doit être à 60 °C.

Il convient de calculer la valeur théorique de réglage de la pression de condensation en considérant :

- une BP à –10 °C ; s/c T : 20 K,
- une perte de 30 K entre le clapet de refoulement et l'entrée de l'échangeur de récupération,
- un delta T (entre l'entrée fluide frigorigène et la sortie ECS) de 10 K,
- le coefficient polytropique $k_{(R22)}$ = 1,23.

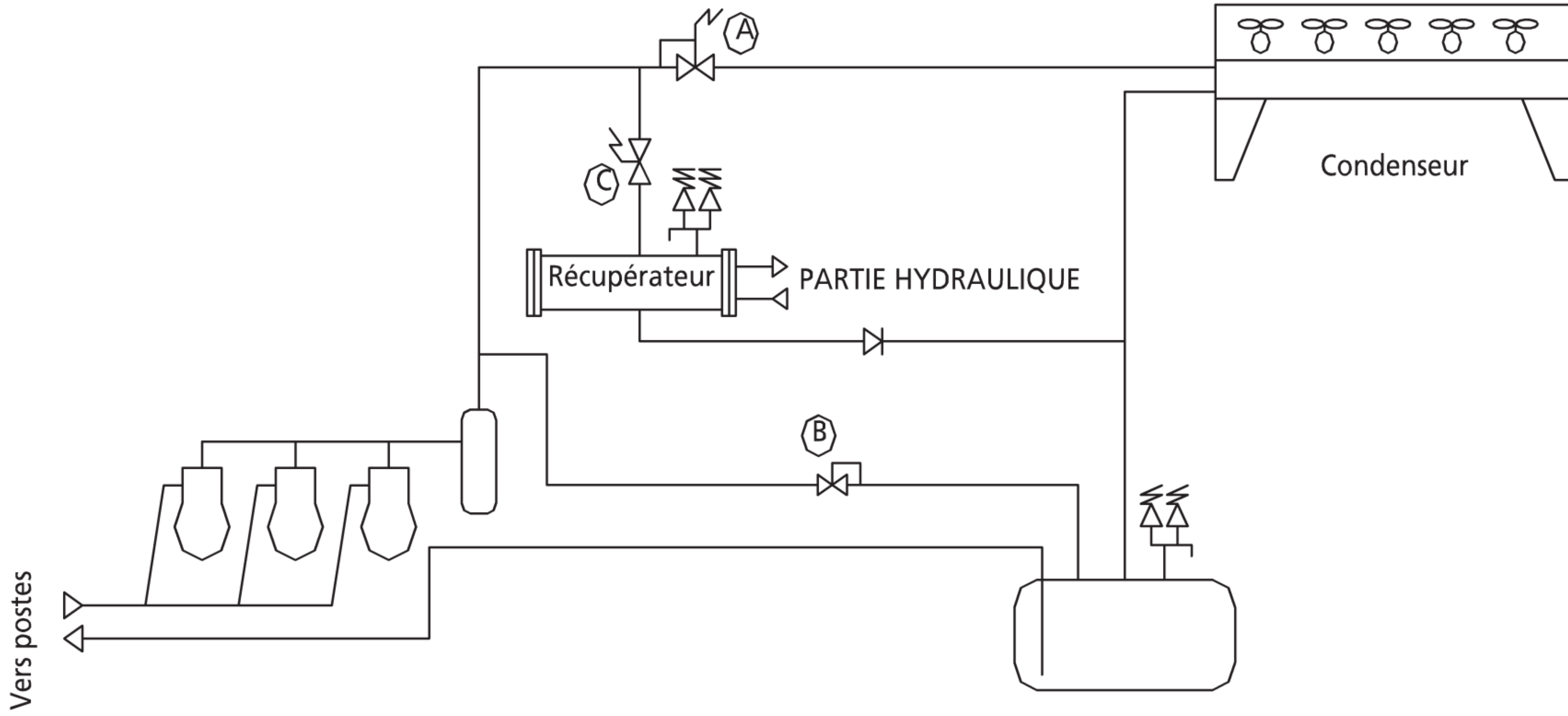


Figure 17.1 Schéma fluidique.

Rappel

$(P2/P1) = (T2/T1)^{(k/k-1)}$

Réponses

a.1) La vanne A est une vanne amont de contrôle de pression de condensation avec ouverture impérative. La vanne B est une vanne aval. La vanne C est une électrovanne.

a.2) La vanne A permet soit un fonctionnement sur le condenseur principal, soit un maintien de pression pour la récupération de chaleur. La vanne B contrôle la pression dans le réservoir pour éviter le flash gaz. La vanne C autorise la récupération de chaleur.

b) Application numérique de la formule $(P2/P1) = (T2/T1)^{(k/k-1)}$

$k_{(R22)}$	T1	P1	T2	P2
1,23	283,15	3,52	373,15	15,40

Le réglage théorique de la vanne est à 15,40 bar abs. (ou 14,4 bar rel.), soit une température correspondant à la relation pression/température d'environ +40 °C.

17.2 Exemple 2

On souhaite régler le PID mixte du régulateur de la vanne d'eau glacée.

Le graphe en figure 17.2 indique le résultat de la température obtenu en limite de stabilité après une action sur la bande proportionnelle positionnée sur 1,5 K.

À l'aide de l'équation de Ziegler-Nichols, on souhaite effectuer les réglages du PID (Kp, Tc et Ti).

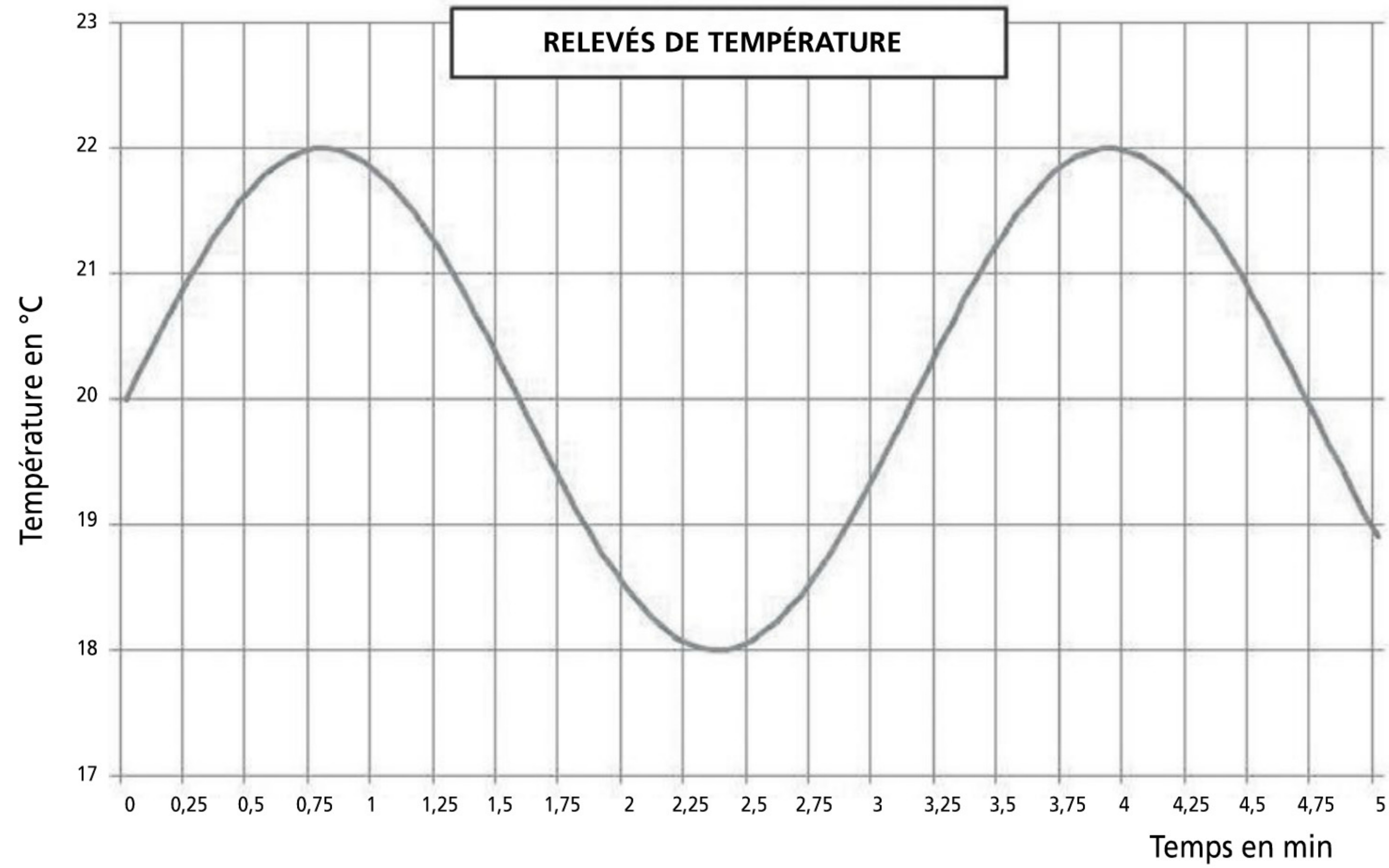


Figure 17.2 Relevé de la température.

Réponses

- Lecture sur le graphe de la période critique : 3,15.
- Détermination des réglages :

$$BP = BPc/0,6 = 1,5/0,6 = 2,5$$

$$Ti = Tc \times 0,5 = 3,15 \times 0,5 = 1,57$$

$$Td = Tc \times 0,125 = 3,15 \times 0,125 = 0,39$$

17.3 Exemple 3

La sonde utilisée a une constante de temps de 1 min et est installée dans une ambiance d'air à –10 °C.

La température de la sonde varie en 20 secondes de –10 °C à –9,5 °C.

On souhaite connaître la température actuelle de l'air ambiant.

Réponse

On applique la formule suivante :

$$\theta_x = \theta_f - ((\theta_f - \theta_0)/e^{t/\tau})$$

avec :

θ_f = température du fluide mesuré *(valeur recherchée)*,

θ_x = température de la sonde à t_x = –9,5 °C,

θ_0 = température de la sonde à t_0 = –10 °C,

τ = constante de temps = 60 s,

t = temps considéré = 20 s.

Soit :

$$\theta_f = ((e^{t/\tau} \,.\, \theta_x) - \theta_0) \,/\, (e^{t/\tau} - 1) = -8,24\ °C$$

17.4 Exemple 4

On souhaite climatiser une salle de process. Après analyse, les besoins sont en chauffage, refroidissement, déshumidification et humidification en fonction des différentes périodes de l'année et du process effectué.

Le site dispose seulement d'électricité et d'eau glacée (batterie d'eau glacée munie d'une vanne proportionnelle).

La température de l'air obtenue avec l'eau glacée ne permet pas d'obtenir le point de rosée souhaité pour la déshumidification.

On décide donc d'installer une roue dessiccante pour effectuer la déshumidification (action TOR).

L'humidification s'effectuera par un humidificateur à action proportionnelle et le chauffage sera réalisé avec trois résistances électriques.

L'installation est réalisée selon le schéma de principe en figure 17.3.

Les conditions à maintenir dans le laboratoire sont :

- température : +22 °C (± 1,5 K),
- hygrométrie : 50 % (± 5 %).

Établir les lois de régulation Signal (%) = F(T) et Signal (%) = F(HR) du régulateur en fonction de la température et de l'hygrométrie de reprise.

Réponse

Voir figure 17.4.

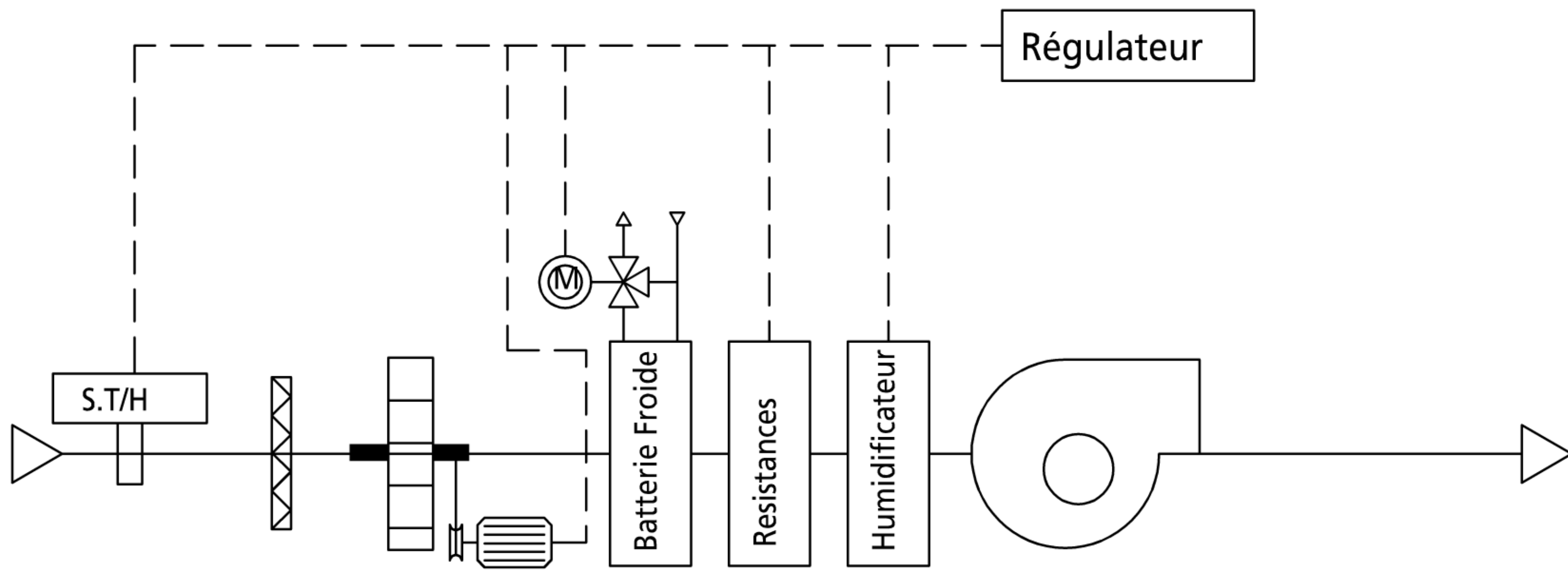
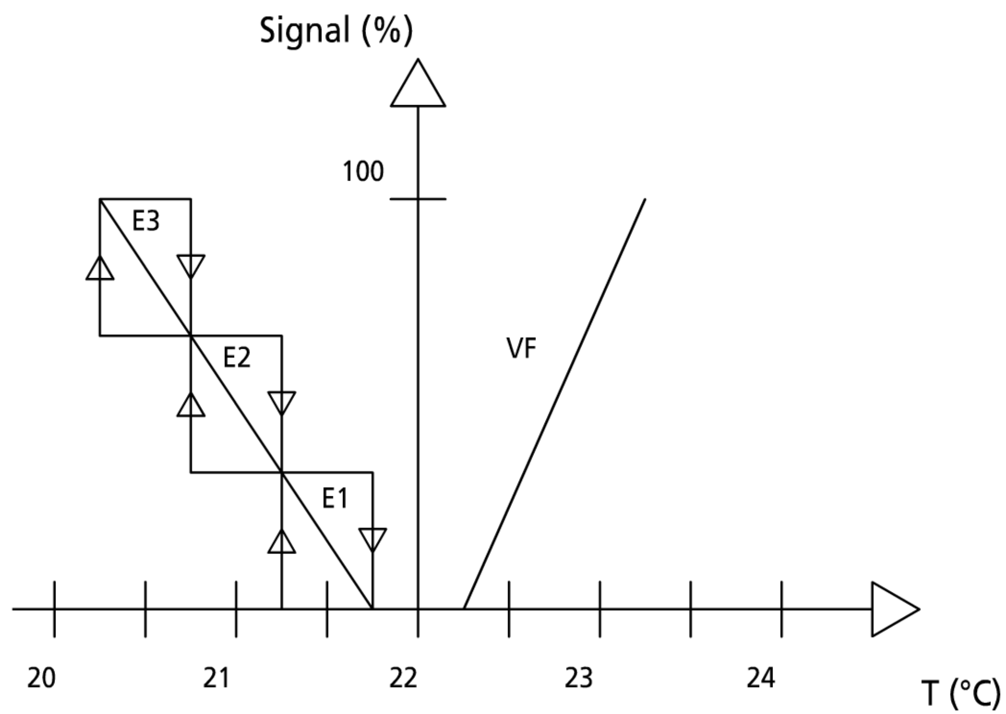


Figure 17.3 Schéma de principe.



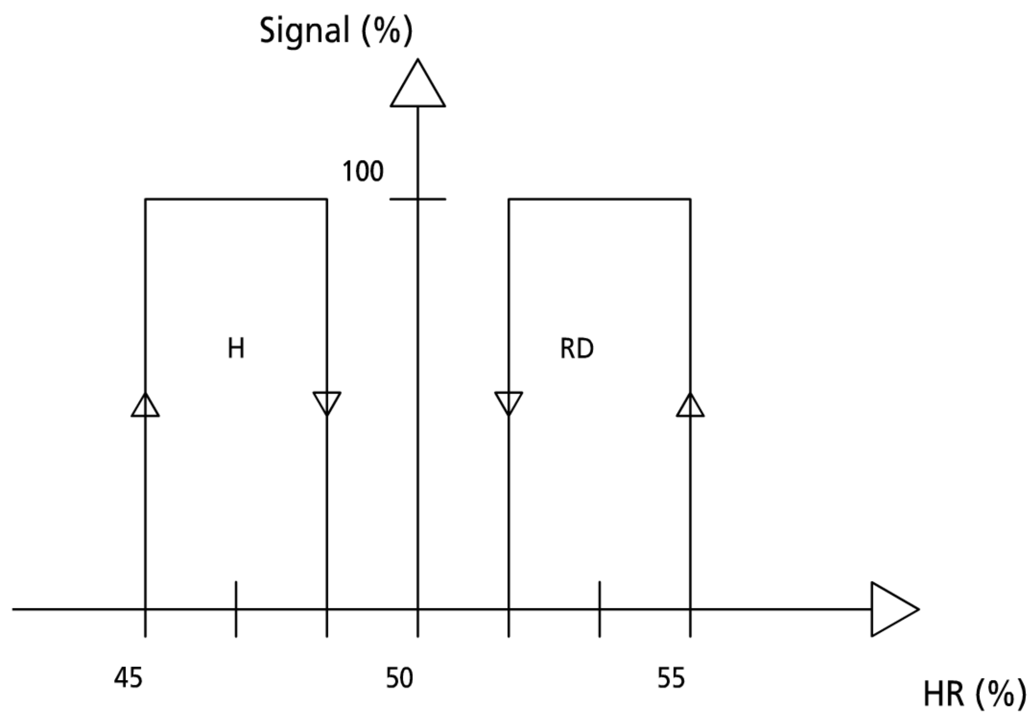


Figure 17.4 Loi des signaux
(VF : vanne froide ; E (1 à 3) : étages électriques ;
RD : roue dessiccante ; H : humidificateur).

17.5 Exemple 5

Dans une patinoire, une installation de production de frigoporteur est constituée de trois compresseurs (sans réduction de puissance).

On souhaite établir la loi de régulation (puissance en fonction de la température) définissant les seuils d'enclenchement et de coupure de chaque compresseur sachant que l'on veut réguler sur le retour à –10/–8 °C.

Réponse

Voir figure 17.5.

17.6 Exemple 6

Établir la cascade HP du condenseur à air d'une installation fonctionnant au R404A sachant que :

- la PS (pression de sécurité) est de 26 bar,
- les ventilateurs sont repartis en quatre étages,
- la HP minimum est fixée à +30 °C,
- delta P entre la coupure et l'enclenchement d'un même étage : 2 bar.

Réponse

Voir figure 17.6.

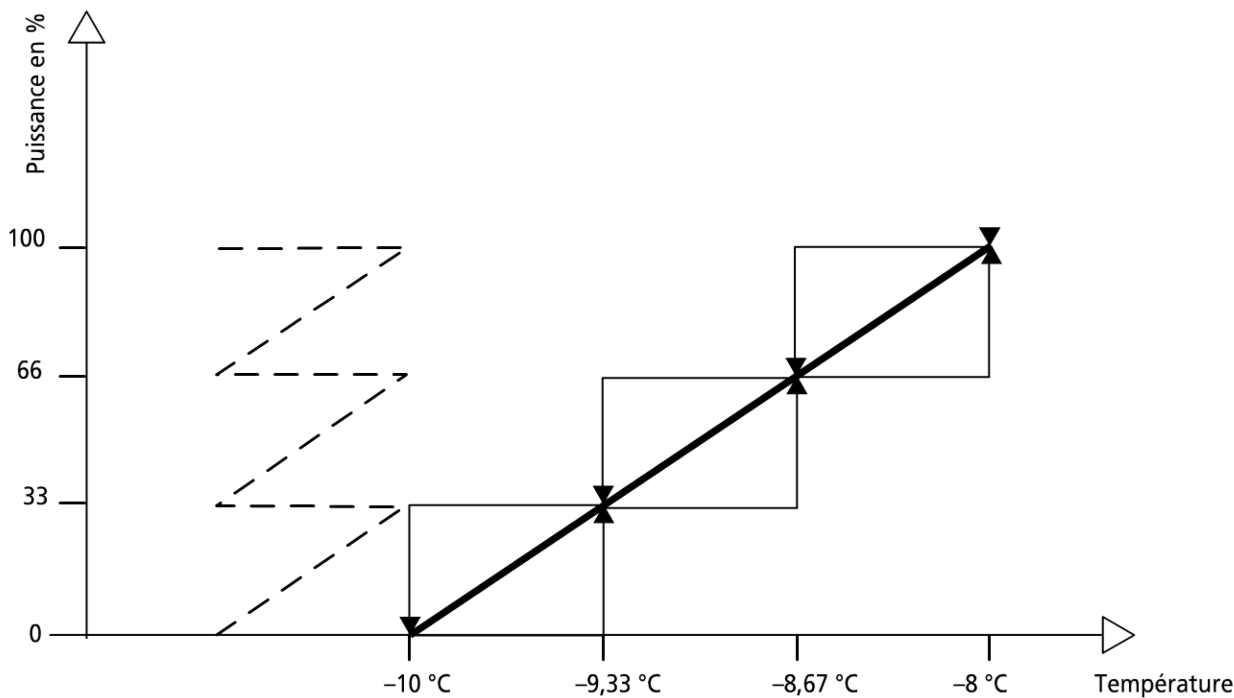


Figure 17.5 Loi de régulation.

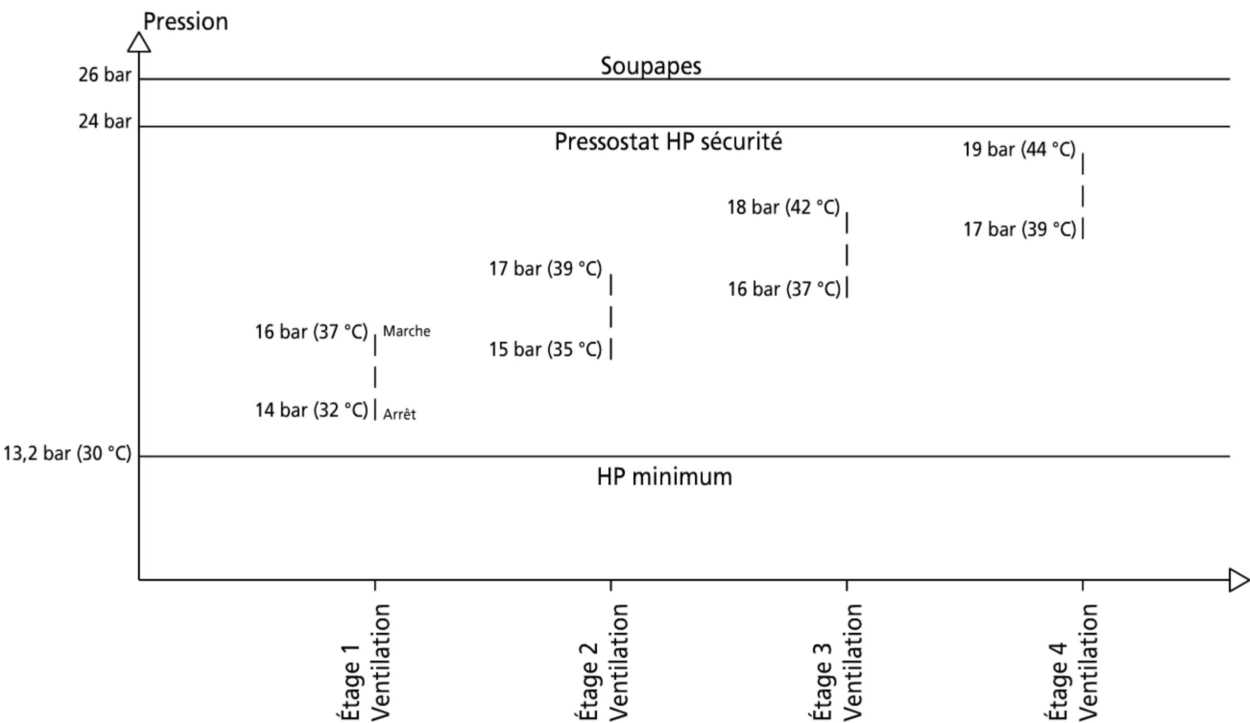


Figure 17.6 Cascade HP.

17.7 Exemple 7

Un refroidisseur de 100 kW de frigoporteur à –20 °C est du type flood à l'ammoniac avec un compresseur à pistons dont le schéma de principe est présenté en figure 17.7.

a) Établir la séquence de fonctionnement du système de réintégration sur un logigramme faisant apparaître les vannes A, B et C.

b) On considère un entraînement d'huile après séparateur de 100 ppm et on procédera à la réintégration d'huile lorsque le bouteillon de 2 litres sera rempli en huile (sans ammoniac).

Calculer le temps de fonctionnement du compresseur entre deux cycles sachant que le débit masse du fluide frigorigène est de 350 kg/h.

Nota

On considérera une densité de l'huile de l'ordre de 0,9.

c) Sachant que l'installation fonctionne 16 h/jour, donner le nombre de manœuvres pour lequel la vanne A devra être prévue, l'installation devant être conçue pour une durée de vie de 20 ans.

Réponses

a) Voir figure 17.8.

b) Débit masse d'huile après séparateur :

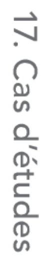
$$(350 / 3\,600) \times (100 / 1\,000\,000) = 9{,}72 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$$

Soit un débit volumique de :

$$9{,}72 \times 10^{-6} / 900 = 1{,}08025 \times 10^{-8} \text{ m}^3\text{/s}$$

Temps de remplissage du bouteillon = $0{,}002 / 1{,}08025 \times 10^{-8} = 185\,142{,}33$ s, soit environ 51 h et 25 min.

Figure 17.7 Schéma de principe.



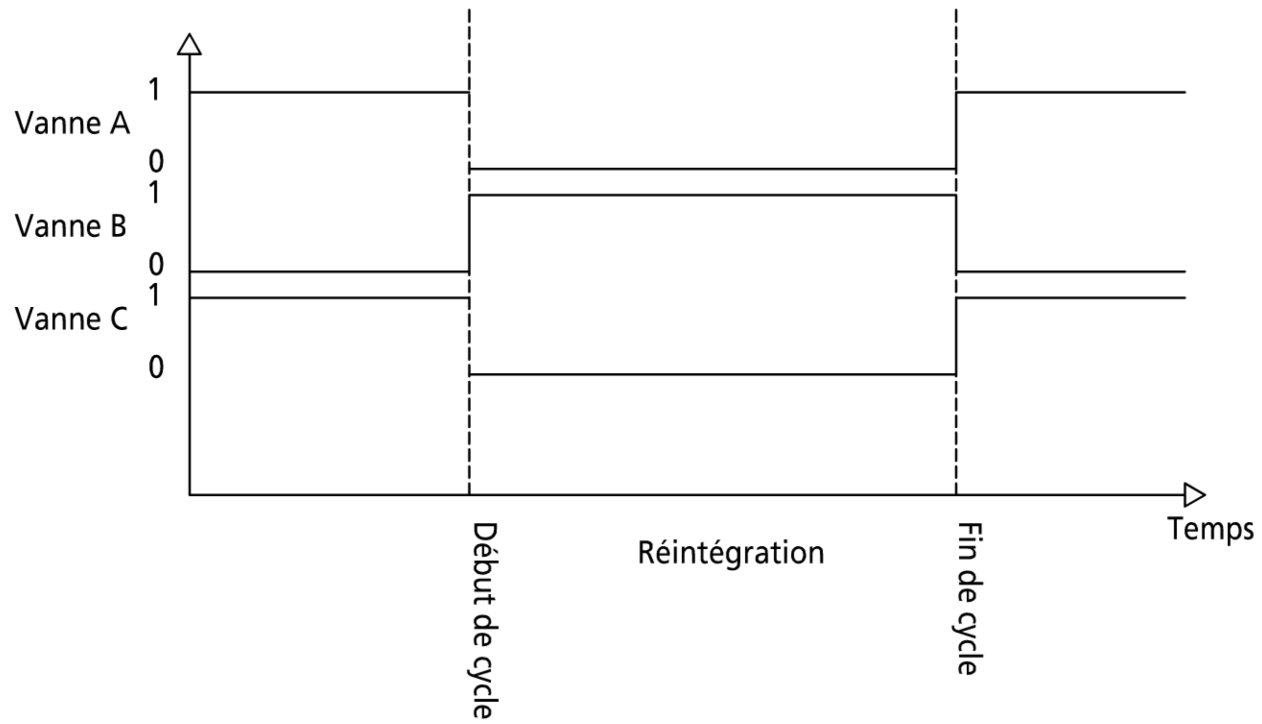


Figure 17.8 Logigramme du cycle de réintégration.

c) De la question précédente, on sait que l'on effectuera une réintégration toutes les 185 142,33 s de temps de fonctionnement.

La durée de vie de la machine donne un temps de fonctionnement sur 20 ans de :

$$16 \times 3\,600 \times 365 \times 20 = 420\,480\,000 \text{ s.}$$

Nota

On néglige les années bissextiles.

Ainsi, le nombre de manœuvres est de :

$$420\,480\,000 \;/\; 185\,142{,}33 \approx 2\,271$$

17.8 Exemple 8

Chaque batterie « frigoporteur » d'une l'installation est équipée d'une vanne trois voies.

On procède aux réglages d'un des régulateurs proportionnels servant à commander ces vannes.

La vanne trois voies est à pleine ouverture de frigoporteur dans une batterie lorsque la tension du régulateur est de 20 mA et complètement fermée lorsque la tension de commande est de 4 mA.

On désire réguler la température de soufflage entre –12 et –8 °C.

Afin de paramétrer le régulateur, il convient de connaître :

a) Le point de consigne sachant que celui-ci correspond à la valeur du signal de commande de la vanne fermée.

b) La loi de régulation.

c) La valeur de la bande proportionnelle.

d) Le type d'action (direct ou indirect).

Réponses

a) Le point de consigne est de : –12 °C.

b) Voir figure 17.9.

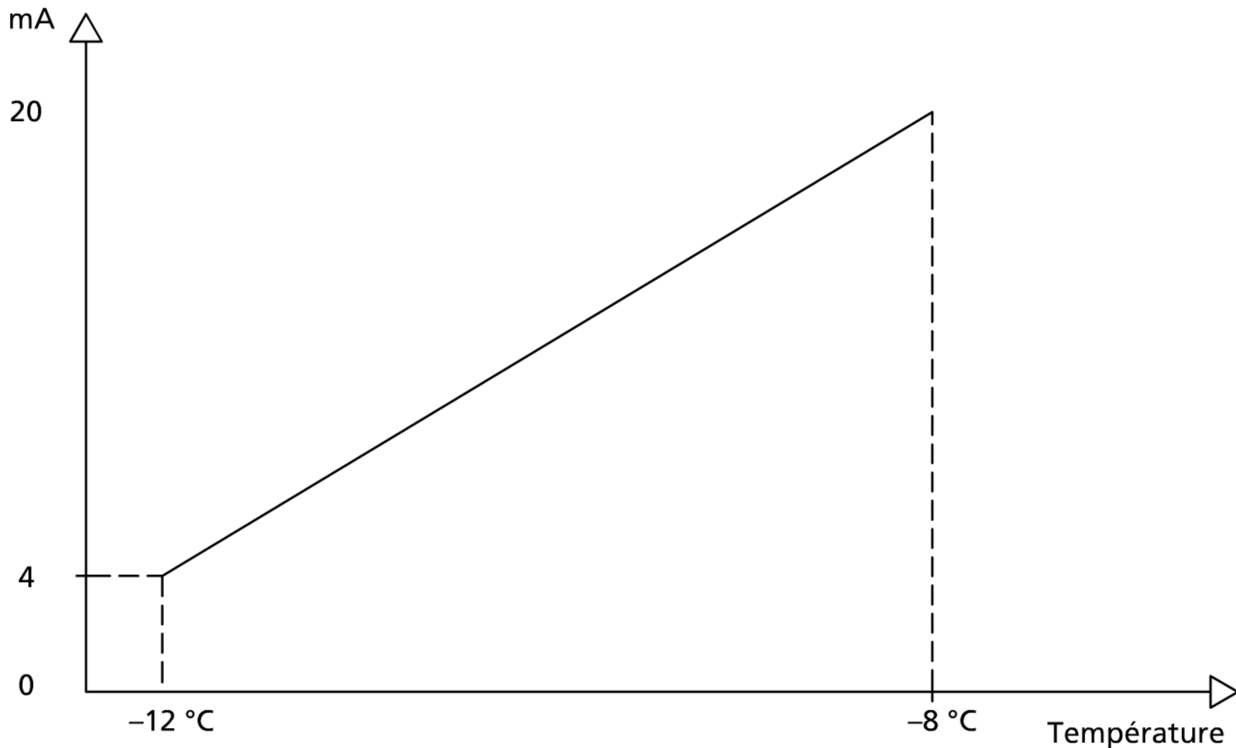


Figure 17.9 Loi de régulation.

c) La valeur de la bande proportionnelle est de 4 K.

d) L'action est du type « direct ».

17.9 Exemple 9

Sur une chambre froide négative à –35 °C équipée de deux évaporateurs et suite au changement du condenseur, on remplace le fluide frigorigène R22 par du R404A.

a) Quelle est la nouvelle surchauffe des anciens détendeurs R22 sachant que celle-ci était initialement à 5 K ?

b) Donner la température d'évaporation de la chambre froide à +20 °C sachant que le MOP des détendeurs est à –20 °C.

c) Après vérification, un des détendeurs est hors service. Il s'agit d'un détendeur thermostatique à égalisation de pression externe. Le dépanneur ne peut effectuer qu'un dépannage provisoire avec un détendeur à égalisation interne au R404A. Calculer la surchauffe obtenue avec ce montage sachant que :

- PDC distributeur = 2 bar,
- PDC évaporateur = 0,5 bar,
- surchauffe réglage d'usine = 5 K.

Réponses

a) Le schéma de force régissant le fonctionnement d'un détendeur est donné en figure 17.10.

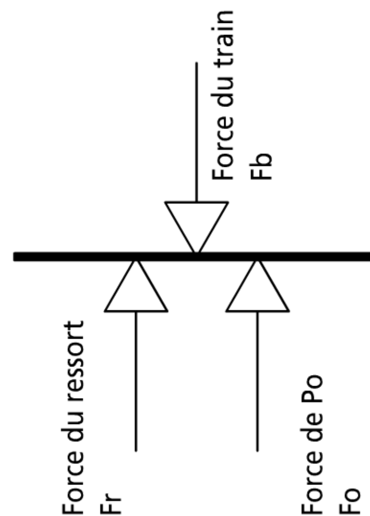


Figure 17.10 Schéma de force.

On considère le fluide équipant le train thermostatique comme étant identique au fluide pour lequel le détendeur est destiné.

Avec :

Fo = force de la pression d'évaporation,

Fr = force du ressort de réglage,

Fb = force du train thermostatique,

Po = pression d'évaporation,

Pb = pression du train thermostatique,

So = surface de la membrane du détendeur en contact avec Po,

Sb = surface de la membrane du détendeur en contact avec Pb.

À l'équilibre :

$$Fr + Fo = Fb$$

Ou :

$$Fr + (Po \,.\, So) = Pb \,.\, Sb$$

En posant So = Sb = S, on obtient, en l'absence d'intervention sur le ressort, l'équation suivante :

$$Pb - Po = Fr / S$$

La chambre froide est à –35 °C, on choisit un delta T de 6 K plus 1 K de perte de charge sur l'aspiration.

Le détendeur au R22 dans une installation au R22 donnait les valeurs d'équilibre suivantes :

$$Pb - Po = Fr / S$$

$$1{,}204 - 0{,}955 = 0{,}249 \text{ bar}$$

Avec :

- relation P/T au R22 à –42 °C = 0,955 bar,
- relation P/T au R22 à –37 °C = 1,204 bar.

Le détendeur au R22 avec le fluide R404A donnera les nouvelles valeurs suivantes :

$$Pb = Po + (Fr / S)$$

$$Pb = 1{,}241 + 0{,}249 = 1{,}49 \text{ bar}$$

Avec :

- relation P/T au R404A à –42 °C = 1,241 bar,
- relation P/T au R22 à 1,49 bar = –32,0 °C.

La surchauffe, initialement de 5 K avec le fluide et le détendeur au R22, sera de 10 K avec le fluide R404A et le détendeur au R22.

b) On considère que la pression du train thermostatique n'évolue plus après le point MOP.

$$Po = Pb - (Fr / S)$$

$$Po = 2{,}447 - 0{,}249 = 2{,}198 \text{ bar}$$

Avec :

- Relation P/T au R22 à –20 °C = 2,447 bar,
- Relation P/T au R404A à 2,198 bar = –29,0 °C.

La température d'évaporation au démarrage sera approximativement de –29 °C.

Nota

Pour plus de précision, il conviendrait de considérer l'évolution isochore dans le bulbe.

c) Afin de déterminer la pression du ressort, on considère dans une première étape qu'il n'y a pas de perte de charge.

On obtient les valeurs suivantes :

$$Pb - Po = (Fr / S)$$

$$1{,}549 - 1{,}241 = 0{,}308 \text{ bar}$$

Avec :

- Relation P/T au R404A à –42 °C = 1,241 bar,
- Relation P/T au R404A à –37 °C = 1,549 bar.

La deuxième étape consiste à intégrer les pertes de charge dans l'analyse.

La pression dans le détendeur sera de = 1,241 + 0,5 + 2 = 3,741 bar.

Les nouvelles valeurs d'équilibres dans le détendeur seront :

$$Pb = Po + (Fr / S)$$

$$Pb = 3{,}741 + 0{,}308 = 4{,}049 \text{ bar}$$

Avec :

- Relation P/T au R404A à 4,049 bar = –12,0 °C.

La surchauffe obtenue avec ce montage sera de –12 – (–42) = 30 K.

7.10 Exemple 10

À l'aide du schéma de la figure 7.11, effectuer le monogramme du fonctionnement en phase de dégivrage « Gaz chaud ».

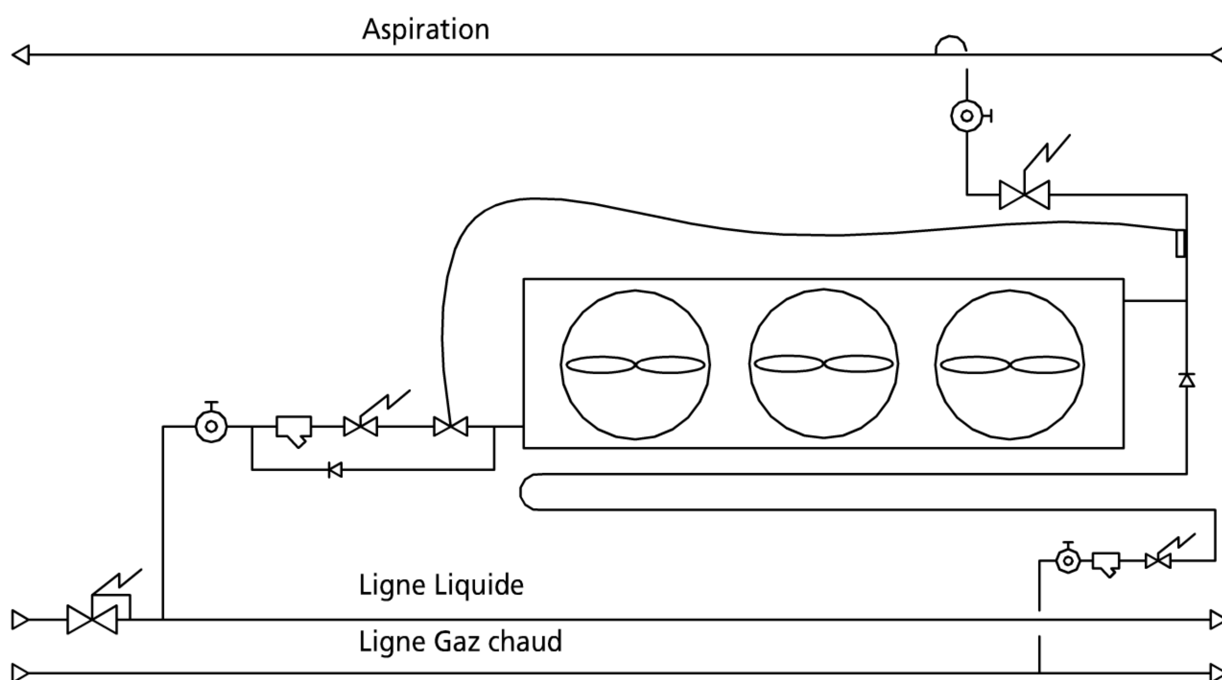


Figure 17.11 Schéma d'installation.

Réponse

Voir figure 17.12.

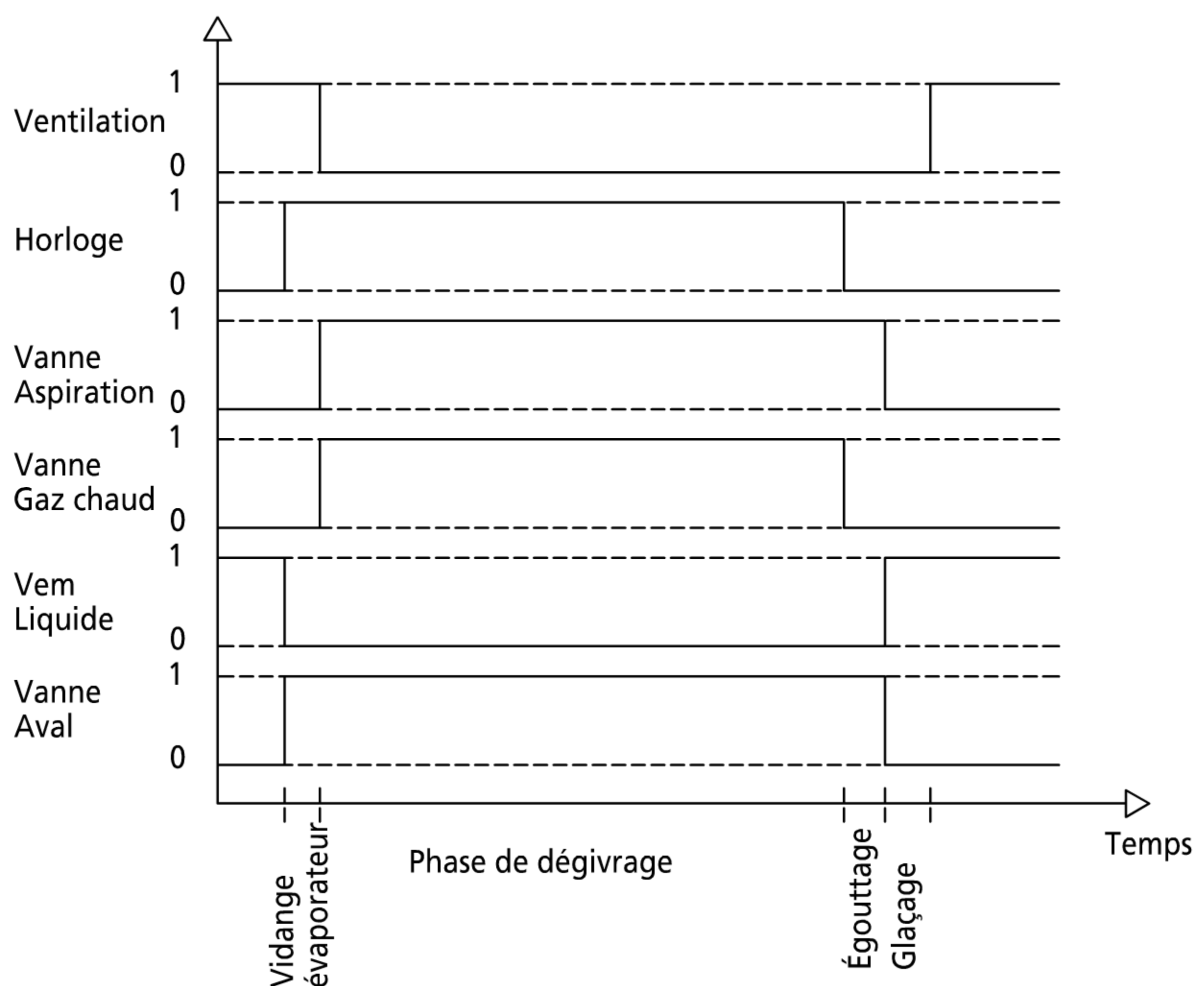


Figure 17.12 Monogramme de fonctionnement en phase de dégivrage « Gaz chaud ».

Remarques

1° En absence d'indication de thermostat de fin de dégivrage, le temps de dégivrage est fixé par l'horloge de dégivrage.

2° Des temporisations additionnelles peuvent être ajoutées telles qu'entre l'ouverture de la vanne d'aspiration et la vanne électromagnétique liquide afin d'éviter tout coup de bélier.

17.11 Exemple 11

On désire piloter la centrale frigorifique (voir schéma de principe en figure 17.13) avec un automate programmable industriel.

On demande d'établir la liste des entrées et sorties en donnant pour chacune d'elles le type (par exemple : sonde de température d'aspiration / analogique).

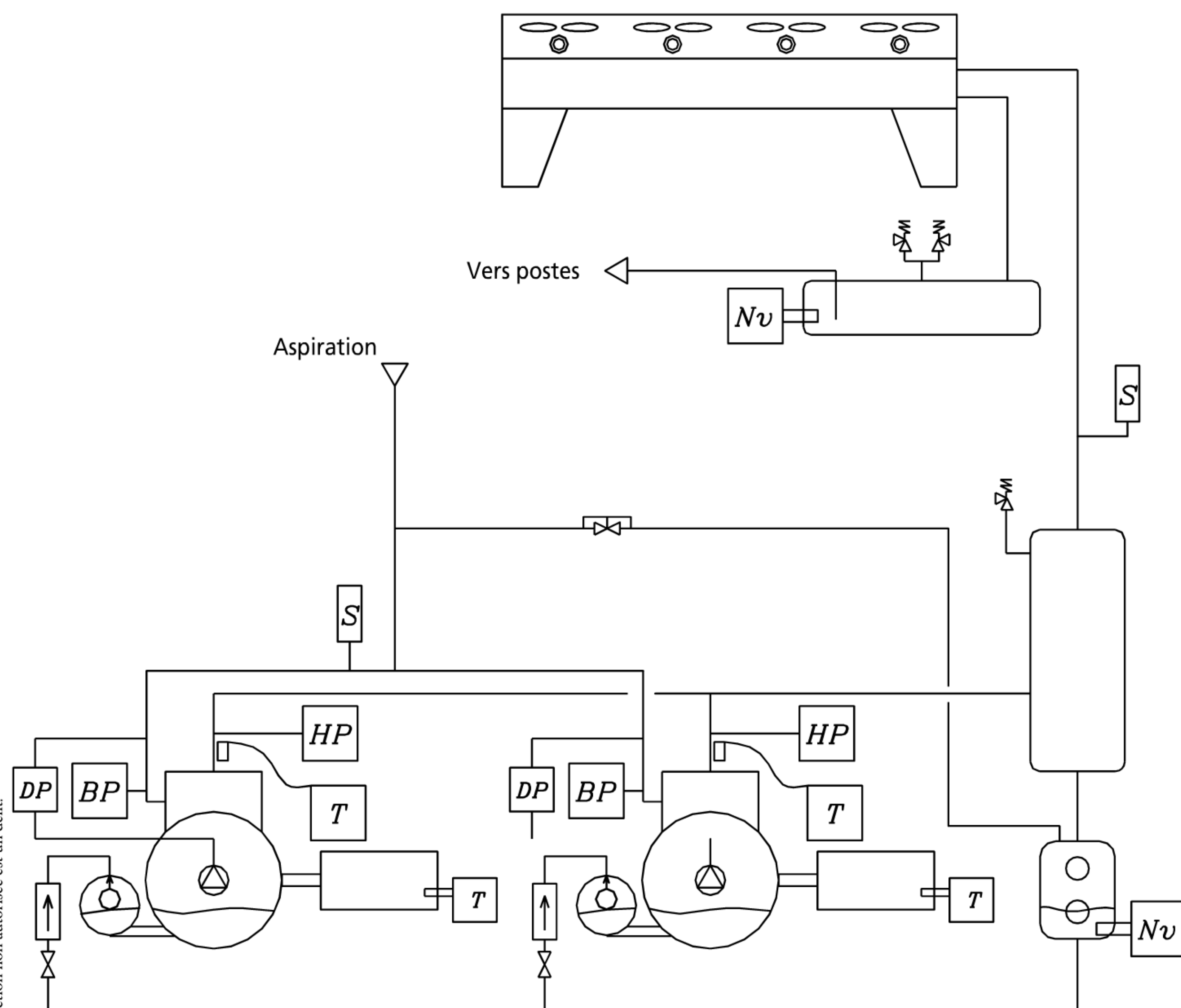


Figure 17.13 Schéma de principe.

Réponses

Définition des entrées

Désignation	Type de signal
Présence tension	TOR
Disjoncteur CP1	TOR
Disjoncteur CP2	TOR
Disjoncteur 1 condenseur	TOR
Disjoncteur 2 condenseur	TOR
Disjoncteur 3 condenseur	TOR
Disjoncteur 4 condenseur	TOR
Niveau de réfrigérant	TOR
Niveau d'huile	TOR
Sonde BP	Analogique
Sonde HP	Analogique
Pressostat BP CP1	TOR
Pressostat HP CP1	TOR
Pressostat huile CP1	TOR
Pressostat thermostat refoulement CP1	TOR
Température moteur CP1	TOR
Pressostat BP CP2	TOR
Pressostat HP CP2	TOR
Pressostat huile CP2	TOR
Pressostat thermostat refoulement CP2	TOR
Température moteur CP2	TOR
Retour marche CP1	TOR
Retour marche CP2	TOR
Retour étage 1 condenseur	TOR
Retour étage 2 condenseur	TOR
Retour étage 3 condenseur	TOR
Retour étage 4 condenseur	TOR

Définition des sorties

Désignation	Type de signal
Chien de garde*	TOR
Compresseur 1	TOR
Compresseur 2	TOR
Étage 1 condenseur	TOR
Étage 2 condenseur	TOR
Étage 3 condenseur	TOR
Étage 4 condenseur	TOR
Relais de défaut général	TOR
Relais de défaut manque de fluide	TOR
Relais de défaut manque d'huile	TOR
Relais de défaut CP1	TOR
Relais de défaut CP2	TOR
Relais de défaut condenseur	TOR

* Selon le type d'automate, le chien de garde est natif ou à déclarer.

17.12 Exemple 12

Soit une pompe ayant un NPSH (Net Positive Suction Head) de 2 m et une perte de charge à l'aspiration de 0,5 m, quelle doit être la hauteur hydrostatique nécessaire (entre les points 0 et 1) afin d'éviter la cavitation de la pompe (figure 17.14) ?

Réponse

En fonction de l'équation de Bernoulli ci-dessus et différentes simplifications, il ressort que :

$$(P_0 - Ps(\theta) / \rho \,.\, g) + h - J > NPSH$$

Avec $P_0 = Ps(\theta)$:

$$\text{hauteur} > NPSH + J$$

J = perte de charge entre les points 0 et 1, donc :

$$\text{hauteur} > 2 + 0{,}5 = 2{,}5 \text{ m}$$

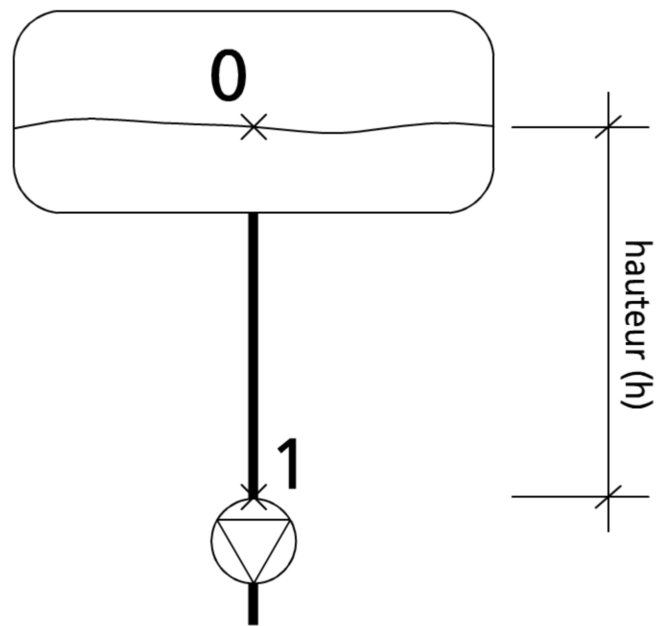


Figure 17.14 Schéma de principe.

Bibliographie

Association Confort Régulation, *Guide de la régulation pour le chauffage et la climatisation*, 1973.

J.-C. Trigeassou, *Méthode de réglage des régulateurs PID*, 1978.

André Gac, *Automatisme des systèmes frigorifiques*, Association française du froid, 1974.

Introduction to process control, Texas Instruments, 1981.

D. Merat, *Initiation à l'électronique*, 1985.

Gérard Chancel, *Initiation à la régulation*, 1985.

Association Confort Régulation, R.Cyssau, *Manuel de la régulation et de la gestion d'énergie*, Pyc Éditions, 1993.

TC, *Traité de thermométrie par thermocouple et résistance*, 1992. www.tcsa.fr/guides.htm

TC, *Précis de régulation de température*, 1992. www.tcsa.fr/guides.htm

C. Ernst, *Régulation et automatisme des systèmes frigorifiques*, 2001.

Georges Vrinat, « Estimation des pertes de pression intratubulaire avec un monofluide », *Revue générale du froid*, vol. 91, 2001. p. 55-58.

André Tassone, *La régulation des MFV*, 2002.

Index